JULIO 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

PLANETAS
¿Cómo será la atmósfera del futuro?

GENETICA
Cromosomas parásitos invaden el genoma

NANORROBOTS
Nuevos mecanismos de navegación

GALILEO
Revolución y proceso

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

¿QUE NOS HACE HUMANOS?

Cambios rápidos en el genoma guían hacia la respuesta

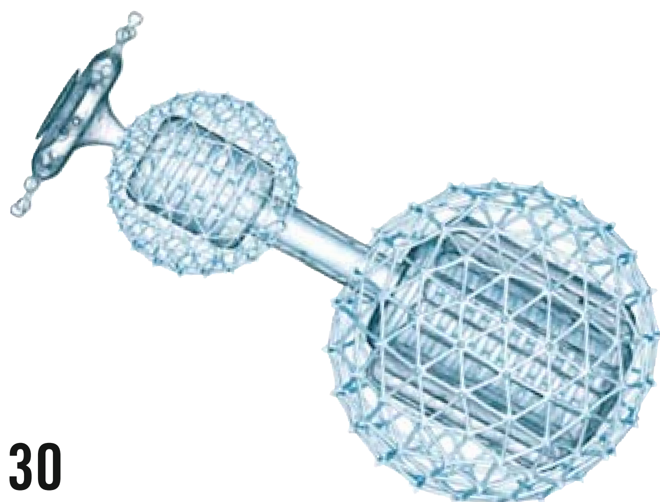


SUMARIO

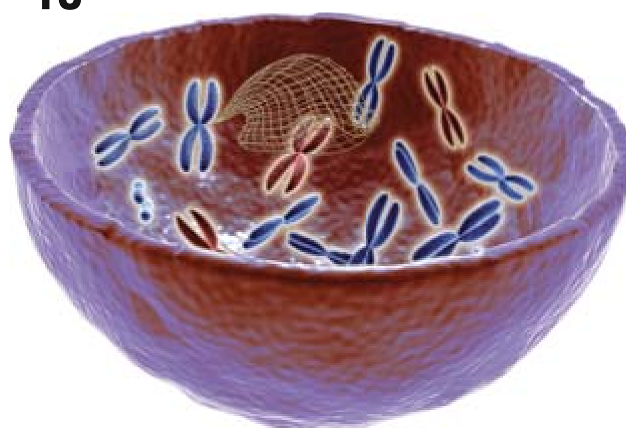
Julio de 2009/ Número 394



Los planetas y satélites pueden perder sus atmòsferas.



El movimiento browniano y la viscosidad dificultan la navegación en la nanoescala.



Los cromosomas parásitos pueden mutar e integrarse como un elemento cooperador más del genoma.

ARTICULOS

INFORME ESPECIAL




24

HAR1, *FOXP2*: cambios rápidos hacia la humanización.



El número de personas que sufren desnutrición crónica crece en los países menos desarrollados.



Las dificultades para proporcionar suministro sanguíneo limitan el tamaño de los tejidos artificiales.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Peter Brown, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares y Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
MANAGING EDITOR, ONLINE Ivan Oransky
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

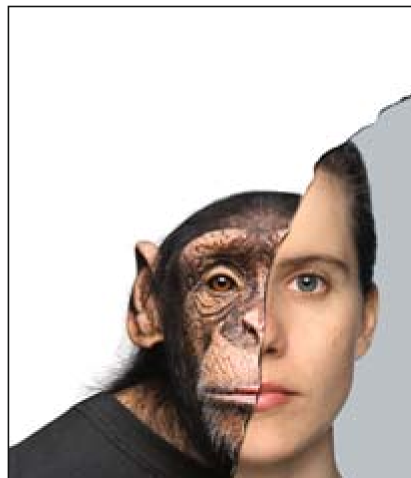
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Pérdidas en las atmósferas planetarias*; Maite Barrón: *¿Qué nos hace humanos?*; Alejandro Moreno: *Propulsión y conducción de nanorrobots*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; I. Nadal: *La revolución de Galileo y la transformación de la ciencia*; Luis Bou: *Espionaje informático por canales indirectos*, *Puesta al día* y *Apuntes*; Juan Manuel González Mañas: *Avances en ingeniería tisular*; J. Vilardell: *Hace* y *Curiosidades de la física*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*



Portada: Cary Wolinsky

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Final sin horizontes

En "Singularidades desnudas" (abril 2009), S Pankaj S. Joshi sostiene que los modelos de colapso estelar pueden producir singularidades desnudas: singularidades que carecen del horizonte de sucesos que rodea a un agujero negro. Según la teoría cuántica, los agujeros negros emiten radiación térmica y se evaporan a causa de la separación de las parejas partícula-antipartícula en la vecindad de su horizonte de sucesos. ¿Desaparecerá alguna vez la singularidad desnuda?

Daniel Chamudot
Riverdale, Nueva York

Si en el horizonte de sucesos la curvatura espaciotemporal y la gravedad tienen valores extremos, aunque finitos, y en la singularidad tales valores son infinitos, ¿cómo puede haber un trayecto desde una región de gravedad y curvatura bajas hasta una singularidad que no atraviese un horizonte?

Lloyd Anderson
Villa Park, Illinois

RESPONDE JOSHI: *Respecto a la pregunta de Chamudot, el horizonte de sucesos es un factor esencial en la evaporación de un agujero negro mediante efectos cuánticos, pero en el caso de una singularidad desnuda todavía es posible que el horizonte de sucesos desaparezca o se evapore mediante procesos cuánticos o clásicos. Los efectos de la gravedad cuántica, por ejemplo, podrían crear una enorme presión negativa que forzara a la estrella a emitir la mayor parte de su masa en fases posteriores del colapso. Además, procesos clásicos, por ejemplo poderosas formaciones de choque creadas por las inhomogeneidades de la densidad de la materia en la vecindad de la singularidad desnuda, podrían hacer que ésta explotase.*

En cuanto a la consulta de Anderson, los valores locales de la densidad o la curvatura no son los únicos factores que determinan las trayectorias de la luz en la relatividad general. Hay aspectos esenciales, como la estructura causal del espaciotiempo y las propiedades globales de los conos de luz, que son resultado sobre todo de la no linealidad de las ecuaciones de Einstein; los estudios detallados de los modelos de colapso implican, además, que la gravedad puede ser arbitrariamente grande y densa en un colapso estelar, sin que por eso resulte imposible escapar de ella. Los grandes valores de densidad o de curvatura no significan necesariamente que exista un horizonte de sucesos.

En la gravitación newtoniana, la densidad es el único parámetro que determina el comportamiento de un campo gravitatorio. Pero en la relatividad general existen 10 potenciales gravitatorios métricos, y estos elementos pueden dar, y dan, origen a numerosas características nuevas de la gravitación y sus interacciones en el universo.

¿Son preferibles las soluciones grandes?

Me preocupa que el artículo de Matthew L. Wald "Energías de fuentes renovables" (mayo 2009), igual que la mayoría de los empeños recientes por desarrollar las energías renovables, esté orientado a proyectos acometidos por grandes empresas. Semejante modo de proceder protegerá aún más los intereses creados del sector de la energía, aun cuando ésta debiera ofrecerse al público en general. Los generadores eólicos instalados en un tejado no tienen por qué proporcionar los voltajes que requieren los grandes aerogeneradores para su adaptación y conexión a la red eléctrica. Y la producción de uno de estos generadores domésticos se puede almacenar en baterías o grandes condensadores que sirvan también de aislamiento. No deberíamos perder la oportunidad de sacar provecho del ingenio de individuos de todo el mundo para conseguir soluciones locales.

Jeremy Gorman
Wilmington, Vermont

RESPONDE WALD: *Es limitado el dinero disponible para equipos de energía renovable y debería gastarse allá donde produzca la mayor cantidad de energía y reemplace al máximo los combustibles fósiles. Los grandes generadores eólicos producen más kilowatt-hora por dólar que los pequeños. Las grandes instalaciones solares cuestan menos por megawatt que las pequeñas (en los grandes parques fotovoltaicos del suroeste de Estados Unidos se invierten mejor los impuestos de los ciudadanos que en las placas solares de los tejados).*

La oposición a las grandes empresas y la oposición al calentamiento global son dos cosas distintas, y mezclar una y otra no sienta bien a todo el mundo.

El dúo electrodinámico

En "El principio de la localidad" (mayo 2009), David Z. Albert y Rivka Galchen cuestionan la viabilidad de la relatividad especial porque la mecánica cuántica no respeta el principio de localidad, al contrario que la relatividad especial. Pero la más acertada teoría física a nuestro alcance —la electrodinámica cuántica— es una amalgama plenamente coherente de ambas teorías que atina en sus predicciones de los resultados de experimentos prácticos.

Lawrence R. Mead
Universidad del Sur de Mississippi

RESPONDEN ALBERT Y GALCHEN: *Aunque la electrodinámica cuántica sea asombrosamente buena en cuanto a predecir los resultados de una gran variedad de experimentos en sistemas de mecánica cuántica, no nos dice cómo se producen mecánicamente tales resultados. Y toda explicación fundamental de la naturaleza debe sin duda dar respuesta a esa pregunta. El teorema del físico irlandés John S. Bell debatido en nuestro artículo demuestra que toda respuesta de esa naturaleza debe introducir en el mundo ineluctablemente la no localidad, en la que radica el conflicto planteado con la relatividad especial.*

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Wolfgang Pauli. «Es perfectamente conocida la absoluta ineptitud de los físicos teóricos para manejar artefactos experimentales; de hecho, se dice que el prestigio de un físico teórico se mide en función de su capacidad para romper, sólo con tocarlos, los aparatos más delicados. Según ese patrón, Wolfgang Pauli era un físico teórico de los mejores; los aparatos se caían, se rompían, saltaban en añicos o empezaban a arder en cuanto él ponía los pies en un laboratorio. El principio de exclusión de Pauli, por otra parte, debe su importancia a que contribuyó a aclarar la estructura interna del átomo, de acuerdo con el modelo atómico de Bohr.

—George Gamov.»

Morfina, cafeína. «Desde los tiempos más remotos, los alcaloides han servido al hombre como medicinas, venenos y sustancias creadoras de sueños. Nuestra egocéntrica visión del mundo nos hace esperar que los alcaloides desempeñen una función de una importancia semejante en las plantas que los generan. Resulta, pues, sorprendente descubrir que muchos de ellos carecen de una función identificable. Por lo general, parecen ser unos productos imprevistos o accidentales del metabolismo de los tejidos vegetales.»

...cien años

Partidos nocturnos. «Recientemente se ha jugado con éxito en Cincinnatti un partido de béisbol nocturno. Para iluminar el campo se emplearon unos potentes reflectores. El Estadio de la Liga Nacional de Béisbol de Cincinnatti, donde se jugó el primer partido [entre los Elk Lodges de Cincinnatti y el Newport, de Kentucky], fue rodeado de torres de acero de casi 35 metros de alto, con dos potentísimas lámparas de carbono cada una. Ni un rincón del campo escapó a la brillante iluminación de un total de 14 lámparas. La invención se debe a George F. Cahill, quien se ha tomado un gran interés en lo que podría llamarse el perfeccionamiento mecánico del juego de béisbol.»

[NOTA: El primer partido nocturno de la Liga de Primera División de Béisbol se jugó en Cincinnatti el 24 de mayo de 1935.]

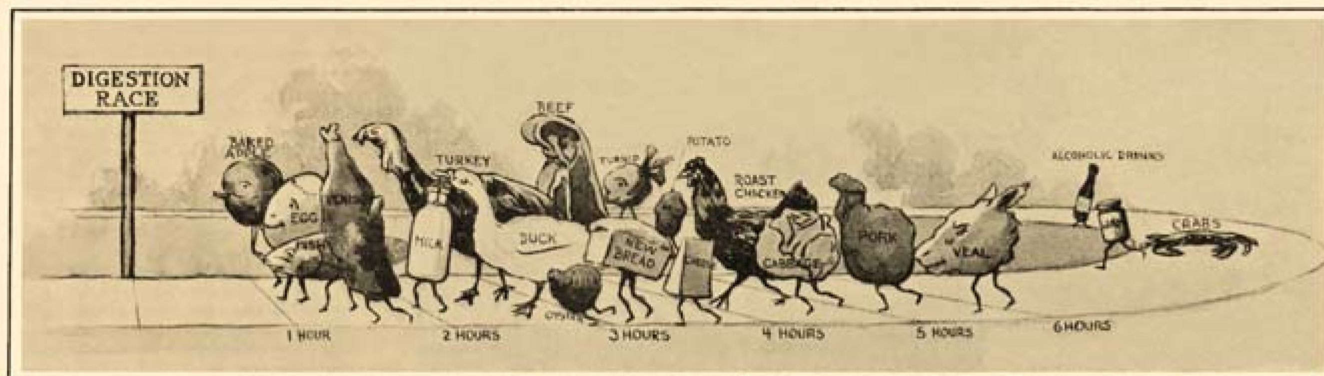
Digestión. «Hemos preparado un grabado que muestra la digestibilidad relativa de varias clases de alimentos. Se verá que la manzana al horno y el huevo crudo están cerca de la meta, con el huevo codo a codo con el pescado. Le sigue el venado, que se digiere en una hora. Lo que dura una mala digestión lo resumen magníficamente el cerdo y la ternera, que requieren, en las condiciones más favorables, unas cinco horas. En la sexta hora, y ya 'fuera de control', vemos la mermelada, los cangrejos y las bebidas alcohólicas de índole diversa.»

...ciento cincuenta años

Mar espumosa. «El maelstrom no es un mito —las antiguas noticias del remolino ante la costa noruega impresionaban por el terror que se le asociaba—, un gran caldero bullente alrededor de un enorme torbellino, al que a veces eran arrastrados ballenas y barcos, y hundidos para siempre bajo sus horrorosas aguas. Es posible que al fin tal remolino exista realmente, pero después de todo no se trata de algo tan tremendo. El señor Hagerup, ministro de marina de Noruega, afirma que el remolino se debe a la subida y bajada de las mareas entre Lofoten y Mosken, que llega a su punto más violento a medio camino entre el reflujo y la pleamar.»

El ajedrez como vicio. «Se ha extendido por todo el país un pernicioso entusiasmo por aprender y jugar al ajedrez; en pueblos y ciudades han proliferado numerosos clubes para la práctica de ese juego. ¿Por qué deberíamos lamentarlo? La respuesta es que el ajedrez es un pasatiempo de índole inferior, que roba a la mente un tiempo precioso que podría dedicarse a la adquisición de otros conocimientos más nobles, sin que reporte beneficio alguno al cuerpo. El ajedrez ha conseguido una gran reputación como medio para disciplinar la mente, pero las personas que ejercen actividades sedentarias no deberían practicar un juego tan poco movido como ése; lo que necesitan son ejercicios al aire libre, no porfías mentales de tal jaez.»

CARRERA DE LOS ALIMENTOS a través del cuerpo humano, según una viñeta de 1909. De izquierda a derecha: Carrera digestiva, manzana al horno, huevo, pescado, venado, leche, pavo, buey, pato, nabo, pan fresco, patata, queso, pollo asado, repollo, cerdo, ternera, mermelada, cargrejos y bebidas alcohólicas.



SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CI, N.º 3; 17 DE JULIO DE 1909

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Enigma en el Pérmico

La extinción en masa, al final del período Pérmico, hace unos 250 millones de años, supuso la desaparición de al menos el 90 por ciento de las especies marinas y el 70 por ciento de los vertebrados terrestres [*véase* "La mayor extinción biológica conocida"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre, 1996]. Nuevos hallazgos llevan a pensar que aquella mortífera catástrofe pudo haber acontecido separadamente en las tierras y en los mares.

Robert Gastaldo, paleontólogo de Colby College, y sus colaboradores han investigado antiguas rocas sedimentarias en la cuenca de Karoo, en Sudáfrica. En expediciones anteriores se había identificado en esa área una delimitación clara entre el Pérmico y el Triásico, que vino inmediatamente tras él. Se trata de una región sedimentaria, tildada de "zona sin vida", yacente sobre fósiles de reptiles extintos, que ha proporcionado la principal prueba de los rápidos efectos que tuvo en tierra firme la extinción de finales del Pérmico.



Fósil de un anfibio del Pérmico que debió de ser el primer vertebrado en conquistar tierra firme, pero desapareció en una extinción masiva.

Pero el equipo de Gastaldo ha descubierto ahora que parte de ese sedimento yace a unos ocho metros bajo la divisoria pérmico-triásica, y que en ciertos lugares se encuentra por debajo de esos fósiles, lo que significa que su deposición hubo de ser muy anterior a la catástrofe en tierra. Esta modificación en la cronología pudiera indicar que las extinciones marinas y terrestres fueron provocadas por causas distintas. Entre los culpables de haber modificado tan mortalmente el clima y los mares pudieran contarse la deriva continental y el vulcanismo. Se puede hallar información más completa excavando en *Geology* del mes de marzo.

—Charles Q. Choi

Fin de las restricciones

Como se esperaba, el presidente Barack Obama firmó el pasado 9 de marzo una orden que derogaba la prohibición de ciertas investigaciones con células madre, impuesta por la administración Bush en 2001. Dicha restricción había impuesto a los científicos que recibieran financiación federal la limitación de investigar sólo 21 líneas de células embrionarias pluripotentes, lo que podría dificultar los esfuerzos para dar a tales células aplicaciones terapéuticas. Los investigadores pueden ahora utilizar centenares de líneas nuevas; asimismo, es verosímil que parte de los 8000 millones de euros asignados al paquete de estímulos económicos para investigaciones relacionadas con la salud fluyan hacia trabajos con células embrionarias. El Departamento de Salud y Servicios Humanos estadounidense emitirá este verano directivas sobre ética y comunicación de las investigaciones.



Contra la gripe

La obtención de una vacuna universal, efectiva para muchas cepas del patógeno, constituye uno de los objetivos para combatir la gripe [*véase* "Walter Fiers: Un pinchazo para acabar con la gripe"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto, 2008]. Pero la cubierta exterior de este virus, que consta principalmente de dos proteínas (hemaglutinina y neuraminidasa), muta con frecuencia, lo que obliga a la reformulación de vacunas en cada estación.

En dos estudios se da cuenta del descubrimiento de anticuerpos humanos cuya diana es una porción de la hemaglutinina que no varía demasiado. (En contraste, los fármacos actuales, como el Tamiflu, se dirigen contra la neuraminidasa.) Uno de los anticuerpos ha conseguido, en ensayos con ratones, proteger a los múridos de dosis letales de gripe aviar (H5N1) y de otras cepas. Sin embargo, se requirieron dosis elevadas, por lo que cualquier tratamiento para humanos resultaría caro. Los artículos correspondientes se han publicado en *Nature Structural and Molecular Biology* del mes de marzo, y en la Red, el 26 de febrero, por *Science Express*.



Nuevas esperanzas en la protección antigripal.

Efectos secundarios legales

En EE.UU., las compañías farmacéuticas han quedado sin refugio ante reclamaciones legales. Ello se debe a una decisión del Tribunal Supremo, dada a conocer el 4 de marzo, que permite a los jurados conceder indemnizaciones en el caso de efectos secundarios dañosos, incluso aunque el fármaco cuente con rótulos de advertencia adecuados y aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA). Esta decisión, contraria a Wyeth Pharmaceuticals, puede animar a más acuerdos extrajudiciales, como en el caso del analgésico Vioxx, que provocó fallos cardíacos en algunos pacientes. Podría asimismo impulsar una nueva legislación que permitiera querellarse contra los fabricantes de dispositivos médicos, que el Tribunal dejó a salvo de tales demandas el año pasado.

—Kate Wilcox

SHEILA TERRY *Photo Researchers, Inc. (fósil)*; CHRIS KLEPONIS *Getty Images (Obama firmando)*; JEFF HAYNES *Getty Images (vacunación)*

COMPORTAMIENTO

La planificación de los simios

Un chimpancé aficionado a arrojar piedras en el Zoológico Furuvik de Suecia demuestra que los primates no humanos pueden hacer planes de futuro. Durante los últimos años, Santino exhibe su dominancia todos los días en torno a las once de la mañana, gritando y corriendo, un comportamiento típico de los chimpancés macho. Además, de vez en cuando, tira piedras a los visitantes del zoo (si bien, por fortuna, tiene muy mala puntería y nadie ha sufrido heridas de consideración). Los trabajadores del zoo han visto que, a lo largo de la mañana, recoge tranquilamente su munición en el foso que rodea su hábitat y golpea las piedras contra las rocas hechas de cemento que hay en su isla, para formar discos del tamaño de un plato de postre. Después, Santino hace un montoncito con sus armas. Estas observaciones, descritas en *Current Biology*, confirman los experimentos de laboratorio que muestran que los simios se preparan para hechos venideros.

—*Coco Ballantyne*



SANTINO arroja a los visitantes del zoo piedras que recoge y prepara con antelación.

ECOLOGISMO

El Artico, sin redes



Es posible que los organismos reguladores protejan una pesquería antes de que nadie tenga ocasión de lanzar una red. La región ártica se ha vuelto atractiva con la fusión de los hielos polares y la consiguiente migración de salmónidos y otras especies hacia aguas más septentrionales. Como se carece de estudios sobre el impacto de la pesca comercial en la zona, el consejo de gestión pesquera del Pacífico Septentrional estadounidense —que se encarga de la administración de las aguas de Alaska— votó por unanimidad el 5 de febrero pasado la prohibición de cualquier tipo de pesca en todas las aguas estadounidenses situadas al norte del estrecho de Bering, lo que supone más de medio millón de kilómetros cuadrados. Serán necesarias investigaciones que determinen los volúmenes seguros de capturas y el impacto sobre las poblaciones humanas nativas antes de que puedan empezar las capturas. La prohibición propuesta no significa que todo el Artico se encuentre a salvo: son varios los países que reclaman sus derechos, entre ellos, Noruega, que ha iniciado ya la pesca en sus aguas.

—*David Biello*

FISIOLOGIA

Acalorados a 37 ºC: ¿por qué?

El cuerpo humano es como un motor térmico, que genera sin cesar grandes cantidades de calor, y su radiador, por así decirlo, dispersa el calor con menor eficacia en climas cálidos.

El calor constituye un subproducto inevitable del trabajo que realizan los tejidos corporales. La contracción de los músculos de corazón, del diafragma y de las extremidades, las bombas de iones que mantienen las propiedades eléctricas de los nervios y las reacciones bioquímicas que descomponen los alimentos y sintetizan nuevos tejidos (por mencionar sólo algunos procesos) generan sin cesar calor corporal. Con este volcán de órganos internos activos, el cuerpo tiene la necesidad crítica de disipar calor a sus alrededores. Para ello hace circular sangre cerca de la superficie de la piel, exhala aire caliente y saturado de humedad, y evapora sudor.



Estos procesos se desarrollan de forma óptima cuando la temperatura ambiente ronda los 22 ºC, temperatura a las que nos sentimos cómodos, a la vez que permiten mantener la temperatura en el interior del cuerpo a unos 37 ºC. Pero cuando la temperatura ambiente iguala la temperatura de nuestras entrañas, los mecanismos de evacuación térmica no funcionan en condiciones óptimas, y sentimos calor, en especial cuando la humedad es elevada. La humedad posee un efecto importante, porque el agua del cuerpo absorbe enormes cantidades de calor que después son disipadas por evaporación. Cualquier situación que dificulte esta evaporación del agua (aire húmedo, aire en calma, vestidos gruesos, etc.) nos hace sentir especialmente acalorados e incómodos.

—*Jeffery W. Walker.*
Profesor de fisiología, Universidad de Arizona

CORTESIA DEL ZOOLOGICO FURUVIK (*chimpancé*); © *iStockphoto*/IRINA IGUMNOVA (*pesca*); CAL CRARY GETTY IMAGES (*hombre acalorado*)

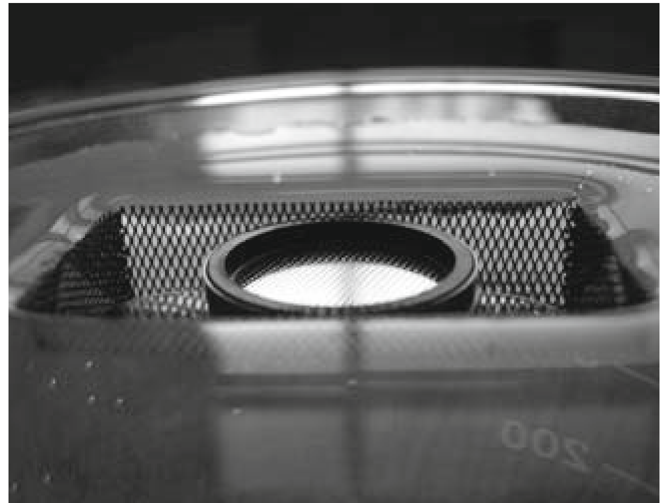
MATERIALES

Salir a flote

Imagine una malla que, en lugar de dejar pasar el agua, la repeliese con tal fuerza que un chaleco salvavidas hecho con ella pudiese sostener a un caballo. Un grupo de científicos del Instituto Tecnológico de Harbin, China, han creado una malla así, formada por cables de cobre de 200 micras de anchura y por poros de un tamaño similar o más pequeño. En primer lugar, sumergieron la malla en una disolución de nitrato de plata y después en ácido, lo cual hizo que la plata se depositase sobre el cobre como una estructura foliácea de siete micras de altura. De la misma forma que los pelillos de la parte inferior del *Dytiscus marginalis*, un gran escarabajo buceador, las hojas de plata atrapan una película de aire, haciendo que la malla repela el agua con mucha fuerza.

Unos pequeños barcos del tamaño de un sello de correos, fabricados con estas mallas, se mantuvieron a flote con una carga de arena tres veces superior a la que podían aguantar a flote los fabricados con mallas no tratadas, y seguían sin hundirse incluso cuando sus bordes se sumergían bajo la superficie del agua. Aunque los científicos admiten que no es probable que se pueda aplicar la tecnología de superflotación a barcos de tamaño normal, ya que la repulsión hidrofóbica podría ser demasiado débil para ellos, creen que es posible que lleve a una nueva generación de robots acuáticos en miniatura.

—Charles Q. Choi



MALLA DE SUPERFLOTACION que sostiene un pesado disco reflectante.

PSICOLOGIA

Medio lleno o medio vacío

Las personas suelen tender a fijarse, bien en los sucesos buenos, bien en los malos, y es posible que una variación genética común subyazca a estas tendencias al optimismo o al pesimismo. Un grupo de científicos de la Universidad de Essex, Inglaterra, ha investigado la serotonina, un neurotransmisor vinculado al estado de ánimo, y ha estudiado las preferencias que un grupo de 97 voluntarios tiene por distintos tipos de imágenes. Las personas que sólo eran portadoras de versiones largas del gen de la proteína que transporta la serotonina y de la que dependen los niveles de este neurotransmisor en las células del cerebro, solían prestar atención a las imágenes agradables (fotografías de chocolate, por ejemplo), a la vez que evitaban las negativas (fotografías de arañas). Las personas que tenían una forma corta del gen mostraban las preferencias opuestas, aunque no tan marcadamente. Los resultados ayudan a explicar por qué algunas personas son menos propensas a la angustia y la depresión, y podrían llevar al descubrimiento de terapias que ayuden a quienes lo necesiten a ver la mitad llena del vaso.

—Charles Q. Choi





¿QUE PREFIERE MIRAR? Los optimistas tienden a prestar atención a imágenes de chocolate, a la vez que evitan las fotografías de arañas, mientras que los pesimistas hacen lo contrario.

BIOLOGIA

Automedicación

Anteriormente, se creía que la capacidad de buscar plantas medicinales estaba limitada a los animales con cerebros avanzados. Por ejemplo, los chimpancés con parásitos intestinales se tragan hojas espinosas para raspar los parásitos que tienen en las entrañas. En cambio, un grupo de investigadores de la Universidad Wesleyana ha encontrado que las orugas de la especie *Grammia incorrupta* también se automedican cuando están enfermas. Las orugas infestadas con larvas parasitarias de mosca comían aproximadamente el doble de alcaloides (en concreto, del alcaloide pirrolizidina) que las no infestadas. Esta toxina se encuentra de forma natural en algunas plantas de las que se alimentan las orugas, como la *Sanguinaria canadensis*. Como resultado, aproximadamente un 20 por ciento más de orugas que consumieron la medicina sobrevivieron hasta la edad adulta, en comparación con aquellas que no lo hicieron. Es el primer ejemplo conocido de automedicación por parte de invertebrados.

—Charles Q. Choi

CORTESIA DE LA SOCIEDAD AMERICANA DE QUIMICA *(malla de superflotación)*; DAVID LIITTSCHWAGER *Getty Images (araña)*; GARETH MORGANS *Getty Images (chocolate)*

El quark top solitario

Las primeras observaciones en las que el quark cima ("top") no aparece acompañado de su antipartícula verifican, una vez más, la validez del modelo estándar de las interacciones fundamentales de la materia

Hace aproximadamente 14 años, la dirección del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi, en los alrededores de Chicago, anunciaba el descubrimiento del último eslabón de la materia básica: el más pesado de los quarks, el quark top, o *t*, o en castellano también cima, por parte de los dispositivos CDF y D0 del acelerador Tevatrón. Con ello, casi se habían descubierto todos los componentes elementales de la materia y de sus interacciones, al menos dentro del modelo estándar. Sólo faltaba completar el modelo con la observación del bosón de Higgs, causante de la masa de las demás partículas fundamentales.

Hasta ahora, la producción del quark *t* se observaba siempre acompañada de su versión de antimateria, el anticima. Sin embargo, el modelo estándar permite también la producción de un *t* "solitario" o "soltero", en el sentido de que no aparece junto a su antipartícula, aunque sí le acompañan otros quarks de tipo diferente, o un bosón W —una de las partículas que transmite una de las cuatro fuerzas conocidas, la interacción débil—. La probabilidad de producir un quark solitario es inferior a la probabilidad de producirlo acompañado de su antipartícula y muchísimo menor todavía que la probabilidad de producir cualquiera de las principales combinaciones de partículas que aparecen en las mismas colisiones que pueden generar quarks *t* solitarios.

Además, la soledad del *t* solitario deja menos herramientas para la interpretación de los resultados, por lo que su observación se anunciaba como una meta extremadamente complicada para la física experimental de partículas.

Sólo un suceso de cada 20.000 millones de colisiones protón-antiprotón del Tevatrón es debido al *t* solitario. Y muchos de los sucesos que se producen en dichas colisiones tienen un aspecto muy similar al esperado para el *t* solitario. Distinguirlo entre ese ingente número de sucesos de "ruido" resulta dificilísimo.

Sin embargo, durante estos catorce años, los investigadores del CDF y del D0 nos hemos empeñado en buscarlo. ¿Por qué? Hay varias razones poderosas para ello, entre las que podemos destacar las siguientes:

- Observarlo es una demostración de la validez del modelo estándar de las interacciones fundamentales llamadas electrodébiles. Los cálculos teóricos predicen con buena precisión cuál es la probabilidad de observarlo. Si los resultados dieran una probabilidad, mayor o menor, que cayese fuera de los errores calculados, sería una prueba irrefutable de una nueva física, no explicada por el modelo estándar.
- Es el único canal —el único resultado posible de la colisión— en que observamos directamente el acoplamiento entre el quark *t* y el siguiente más pesado, el *bottom*, o *b* —también llamado en castellano fondo o belleza—, a través del bosón W. Este acoplamiento viene determinado por un parámetro, V_{tb}, que aparece en la matriz de mezcla de Cabibbo, Kobayashi y Maskawa (a estos dos últimos se les ha concedido el premio Nobel de Física 2008 por sus aportaciones a estos conceptos), que establece la probabilidad de que unas modalidades, o "sabores", de quarks se conviertan en otros.
- Se espera que el parámetro V_{tb} sea próximo a la unidad, lo que significa que el quark *t* se desintegra con una probabilidad mucho mayor en un quark *b* que en otros más ligeros, el extraño ("strange", *s*) o el abajo ("down", *d*). Su medida permite, asimismo, determinar la validez del modelo estándar, cuando se combina con los resultados de los acoplamientos del cima ("top", *t*) con

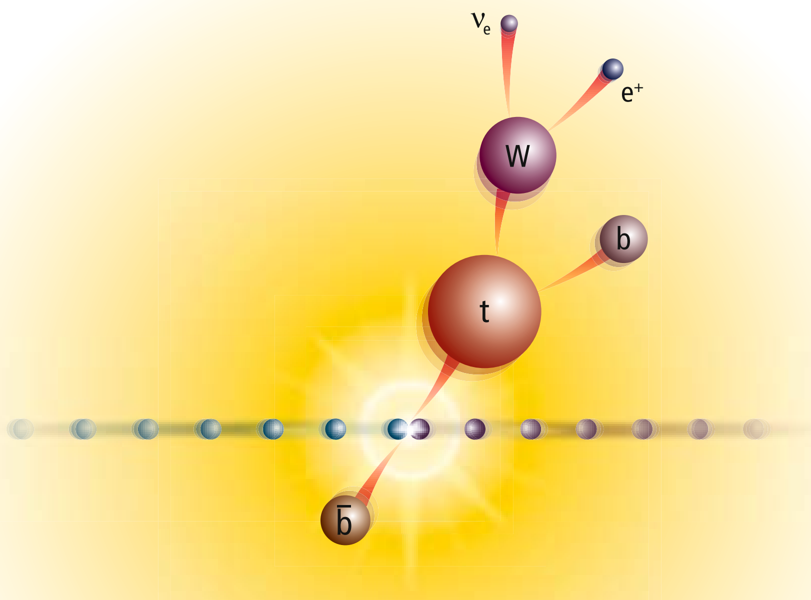


Imagen artística de la colisión de un protón y un antiprotón que produce, en el estado final, un quark cima ("top") solitario (*t*) que se desintegra, inmediatamente, en un quark belleza ("bottom", *b*) y un bosón W, el cual produce un positrón (e^+, antipartícula del electrón) y un neutrino (ν_e). Asimismo, en la colisión surge un antibelleza, la versión de antimateria del belleza (*en la figura, abajo*), que es, junto con el quark top, el resultado de la desintegración de un bosón virtual W. La intensidad de este acoplamiento entre el W, el top y el antibelleza es dependiente del parámetro V_{tb}, un parámetro fundamental del modelo estándar.

CORTESIA DE LA COLABORACION CDF DEL FNAL

los quarks *s* y *d*. (Precisamente el Tevatrón aportó recientemente una medición precisa para los correspondientes parámetros V_{ts} y V_{td} gracias a la primera observación de las oscilaciones materia-antimateria de los bosones B_s, partículas constituidas por un quark *s* y un antiquark del quark *b*; *véase* "Partículas bellas de materia y antimateria", por Alberto Ruiz Jimeno, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2008.)

• La cinemática de los sucesos en que aparece un *t* solitario es muy parecida a la que se espera encontrar en una de las supuestas modalidades de producción del bosón de Higgs, la asociada con el bosón electrodébil *W*. De hecho, la producción del *t* solitario tiene los mismos fondos de partículas acompañantes que esa vía de producción del bosón de Higgs (el tema estrella en la actualidad en física de partículas, tanto para el Tevatrón como para el nuevo acelerador del CERN, el LHC). Además, la producción del *t* solitario es una fuente importante de ruido para la búsqueda del Higgs, por lo que el conocimiento de aquél es esencial para el descubrimiento de éste.

El quark *t* decae inmediatamente, de ser producido, en un quark *b* y un bosón W, el cual decae a su vez de formas diversas. Elegimos la más fácilmente observable, la desintegración en un electrón, o un muon, y un antineutrino (o sus correspondientes antipartículas, dependiendo de la carga del bosón W). El quark *b*, a su vez, y los quarks más ligeros en que también se desintegra el *t*, producen chorros de hadrones. El quark *b*, además, da lugar a trazas de esos hadrones con trayectorias desplazadas del punto de colisión.

Con esas "firmas", o signos, principales —un electrón o muon, chorros de hadrones, alguno desplazado del punto de colisión, y energía perdida por la falta de detección de los neutrinos—, podemos reducir enormemente el ruido, con respecto a la señal correspondiente a los sucesos buscados, gracias a un complejo sistema de selección "sobre la marcha" por ordenadores que permite reducir el ruido en varios órdenes de magnitud. Aun así, el ruido es superior a la señal, por lo que necesitamos además métodos de selección basados en análisis multiestadísticos, que manejan diversas variables dependientes e independientes extraídas de la información cinemática del proceso y de las probabilidades teóricas de que el suceso pertenezca a uno u otro de los tipos de suceso que pasaron las cribas precedentes.

Fueron varios los métodos de selección y análisis que se emplearon: redes neuronales, árboles de decisión potenciados —un procedimiento estadístico para separar fondo y señal—, funciones de verosimilitud...; con ellos se obtuvieron resultados parciales, muy correlacionados, que finalmente se combinaron mediante un análisis de los llamados superdiscriminantes. Así se logró observar y medir por primera vez la producción del "top" solitario. El nivel de confianza de nuestros resultados es tal que la probabilidad de que en realidad se tratase de una fluctuación estadística, correspondiente a otros sucesos de fondo, es inferior a uno en cuatro millones.

Bruno Casal, Alberto Ruiz Jimeno y **Rocío Vilar**
Instituto de Física de Cantabria (IFCA, CSIC-Universidad de Cantabria)

Los inicios de la radiactividad en España

El primer laboratorio español de radiactividad

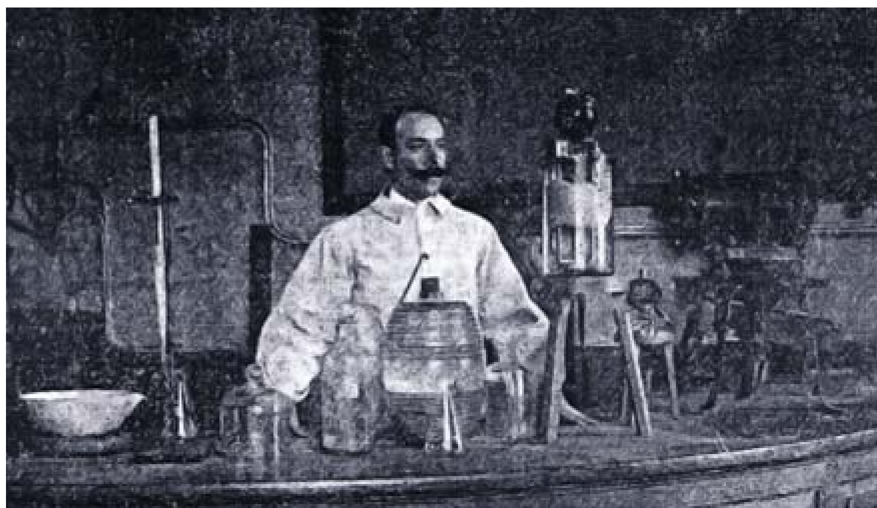
En junio de 1903, el catedrático de mecánica química de la Universidad de Madrid José Muñoz del Castillo asistió como delegado especial de España al quinto Congreso Internacional de Química Aplicada de Berlín. Aunque conocía los trabajos recientes de Pierre y Marie Curie, fue seguramente en esa ocasión cuando vio por primera vez un elemento radiactivo: el "radiotelurio" de William Markwald (posteriormente se demostró que se trataba del polonio descubierto por Marie Curie).

En su informe sobre el congreso, Muñoz muestra su entusiasmo sobre la radiactividad: "la diminuta porción de este elemento [...] que aparecía como una mancha, representaba como valor de extracción la friolera de 3000 marcos. Se necesitan 4000 kilogramos de pechblenda para extraer 10 miligramos [...] Si se aproxima a una serie de chispas, producidas por una corriente eléctrica, desaparecen éstas como por encanto, a causa de la conductibilidad eléctrica que adquiere el aire. Después de puesta a oscuras la sala, aproximó tan precioso elemento al bario, platino y cinc, e inmediatamente se inflamaron, adquiriendo la llama una coloración verde, como si se hubieran tocado con una varilla mágica".

A su vuelta a Madrid, Muñoz consiguió el apoyo de autoridades académicas y políticas para establecer el primer laboratorio de radiactividad de España. Creado en 1904, al amparo de las iniciativas para la regeneración de la ciencia española de principios del siglo XX, el laboratorio del doctor Muñoz centró sus investigaciones en los efectos de la radiactividad en los seres vivos. Sus primeros trabajos implicaron la medición de la radiactividad de aguas y minerales de la península Ibérica, a partir de muestras enviadas por directores de casas



1. José Muñoz del Castillo (1850-1926), creador y primer director del Laboratorio de Radiactividad.



2. Faustino Díaz de Rada en el laboratorio radioquímico del Instituto de Radiactividad en 1917.

de baños y muestras de minerales cedidas por el Museo de Ciencias Naturales.

De esos trabajos resultaron el primer "mapa de la radiactividad en España" (1905) y una estrecha relación entre el laboratorio y la comunidad de médicos hidrólogos, que pronto aprovechó las supuestas virtudes curativas de la radiactividad para publicitar balnearios y aguas minerales.

En 1911, el laboratorio se transformó en instituto, siendo uno de los pioneros en Europa. (El primer instituto del radio se estableció en Viena en 1908; le siguieron los de París y Londres, en 1909.) Con el aumento de categoría y recursos, se estableció una nueva línea de investigación sobre radioagricultura. Los miembros del instituto estudiaron los efectos de la radiactividad en el crecimiento de las plantas; establecieron las bases para la certificación de abonos radiactivos, cuya industria empezaba a despegar poco antes del estallido de la guerra mundial.

Durante el segundo decenio del siglo pasado se realizaron también notables esfuerzos de divulgación; se concretaron en la edición de una revista (el *Boletín de Radiactividad*, del que este año se cumple el centenario de su creación) y la realización de cursos sobre radioagricultura para promover el uso de abonos radiactivos. El instituto logró, asimismo, la autorización del gobierno para expedir certificados de muestras de radio destinado a usos médicos.

El laboratorio quedó aislado de los principales grupos de investigación europeos debido a la oposición de Muñoz a la hipótesis de la desintegración radiactiva. Sin embargo, las relaciones privilegiadas de éste con altas esferas del poder científico y político español le permitieron adjudicarse el estatuto de experto nacional en radiactividad y reclutar importantes recursos humanos y materiales para sus investigaciones. Esta situación se quebró, sin embargo, tras la jubilación de Muñoz en 1920.

Privado de protectores, el instituto sufrió un notable recorte en términos financieros y de personal. El estancamiento de este nicho institucional, junto con la inexistencia de una industria nacional del radio y la debacle de la guerra civil explican la marginalidad de este campo de investigación en España hasta finales del decenio de los cuarenta, cuando el interés de la dictadura de Franco por establecer un programa nuclear nacional convirtió de nuevo a la radiactividad en un área de investigación privilegiada.

Néstor Herran
Centro de Historia de la Ciencia (CEHIC)
Universidad Autónoma de Barcelona

Marismas costeras

Restauración de marismas en el puerto de Huelva

La marisma mareal es un ecosistema frontera entre los medios continental y marino. Su flora y su fauna están adaptadas al encharcamiento prolongado y a salinidades elevadas.

Las marismas mareales poseen destacados valores ecológicos; en efecto, constituye el hábitat de numerosas especies animales y vegetales únicas de los ecosistemas en cuestión. Además, depuran las aguas, son sumideros de dióxido de carbono, poseen valores socioculturales, como las fiestas populares marismeñas, y se prestan a labores productivas: el marisqueo y la captura de cebo para pesca, la extracción de sal, la pesca y la navegación.

Los usos tradicionales mencionados se hallan, en algunos casos, directamente relacionados con aspectos económicos. De hecho, constituyen la principal fuente de ingresos para numerosas familias. Además, las marismas modulan los efectos de las avenidas fluviales, sirven de refugio, zona de cría y producen alimento para especies piscícolas abundantes en nuestras lonjas. Asimismo, las marismas costeras son áreas excepcionales para el turismo ecológico y la contemplación de la naturaleza.

A pesar de sus valores, las marismas costeras han sido históricamente maltratadas, consideradas zonas improductivas y fuente de enfermedades transmitidas por insectos. Afortunadamente, el surgimiento del movimiento ecologista a finales del siglo pasado, el aumento de la concienciación social y un mejor conocimiento científico sobre el funcionamiento de los ecosistemas posibilitaron una defensa creciente de las marismas mareales. Con todo, quedan algunas que están fuera de los límites de los espacios naturales, aunque no tengan valores menores que las zonas protegidas. Este es el caso de las marismas situadas en la Zona de Servicio del Puerto de Huelva, en la orilla izquierda de la ría del Odiel, junto al

BOLETIN DE RADIACTIVIDAD

Se han plantado más de 100.000 m² de *Spartina maritima* (la borraza, o hierba salada) en las marismas de la ría de Huelva.



Polo Químico de Huelva y el entorno de la Punta del Sebo.

La Autoridad Portuaria de Huelva impulsó, a finales de 2006 e inicios de 2007, un proyecto de restauración ecológica en más de 130.000 m² de marismas costeras de la ría de Huelva. En esa zona disfrutaban de ecosistemas bien conservados (marismas, dunas y playas fluviales) antes de los años sesenta. Esta situación cambió radicalmente con la instalación del Polo Químico, que provocó la destrucción directa de muchos de estos ecosistemas, aumentó los niveles de contaminación y degradó el paisaje.

El nuevo proyecto de ingeniería ecológica se basa en la utilización de la gramínea *Spartina maritima* como bioherramienta. *S. maritima* es una especie propia de estuarios europeos que desempeña un papel esencial en la fase inicial de desarrollo de las marismas. Actualmente, *S. maritima* se encuentra en regresión en toda Europa, debido fundamentalmente a la competencia con especies invasoras y a procesos erosivos que están acabando con su hábitat. Sin embargo, *Spartina maritima* es, aún, una especie relativamente abundante en el estuario conjunto de los ríos Odiel y Tinto.

El proyecto tuvo ocho objetivos principales: (1) estabilizar los contaminantes depositados en los sedimentos marismeños durante décadas; (2) luchar contra la erosión de las marismas; (3) conservar varias de las especies vegetales amenazadas en Andalucía, como *Spartina maritima* y *Zostera noltii*; (4) luchar contra la invasión de la planta sudamericana *Spartina densiflora*; (5) aumentar la biodiversidad; (6) favorecer el acerca-

Éntrase el mar por un arroyo breve
que a recibillo con sediento paso
de su roca natal se precipita,
y mucha sal no sólo en poco vaso,
mas su rüina bebe,
y su fin (cristalina mariposa
no alada, sino undosa)
en el farol de Tetis solicita.
Muros desmantelando pues de arena,
Centauro ya espumoso el Ocëano,
medio mar, medio ría,
dos veces huella la campaña al día,
escalar pretendiendo el monte en vano,
de quien es dulce vena
el tarde ya torrente
arrepentido, y aun retrocedente.



El hispanista Robert Jammes, de la universidad de Toulouse, sostiene en la introducción a su edición de las *Soledades* de Góngora que el paisaje de la *Soledad segunda* "... es la parte de la provincia de Huelva que se sitúa entre Huelva y Niebla, es decir, la cuenca del Río Tinto (aunque podría ser la del Odiel) y el estero en que se reúnen ambos ríos".

miento de los habitantes de Huelva a sus marismas; (7) potenciar los recursos turísticos de la ciudad de Huelva, y (8) mejorar paisajísticamente las marismas periurbanas.

La actuación principal para cumplir estos objetivos fue la plantación de más de 100.000 m^2 de *Spartina maritima* en las zonas bajas de las marismas. Medida que se complementó con la plantación de la fanerógama marina *Zostera noltii* en las cotas topográficas más deprimidas. Además, se llevó a cabo la eliminación manual de la invasora *Spartina densiflora* y la plantación de salado blanco (*Atriplex halimus*), salado negro (*Limoniastrum monopetalum*) y tarajes (*Tamarix* sp.) en las zonas de marisma alta, y de pinos piñoneros (*Pinus pinea*) y enebros marítimos (*Juniperus oxycedrus* subespecie *macrocarpa*) en las pequeñas dunas estuarinas.

Esta actuación de mejora ambiental y paisajística se completó con la construcción de una pasarela de madera que permite observar las marismas, las dunas y la ría de Huelva.

Actualmente, existen diferentes intereses sociales y económicos en el futuro de esta zona industrial y marismeña de la Punta del Sebo. Sea cual sea el futuro del enclave, la actuación de mejora ambiental llevada a cabo abre el camino de la conservación ambiental y la mejora paisajística para el disfrute de los onubenses. Los resultados de las actuaciones de este proyecto, sometidos a riguroso seguimiento, son muy favorables. *Spartina maritima* crece y está facilitando la entrada de otras especies vegetales, como los almajos (*Sarcocornia perennis*), y animales, como los cangrejos violinistas (*Uca* sp.) y muchas aves limícolas. Además, la zona está empezando a ser utilizada por muchos peces y por otras especies protegidas: el martín pescador (*Alcedo atthis*), el águila pescadora (*Pandion haliaetus*) o la nutria paleártica (*Lutra lutra*).

En definitiva, un proyecto de mejora ambiental que muestra cómo debe gestionarse la intervención en las marismas costeras, que han sufrido tanto a lo largo de la historia. Un proyecto que servirá de ejemplo para otras marismas europeas.

Jesús M. Castillo,
Guillermo Curado
y **Enrique Figueroa**
Departamento de Biología Vegetal y Ecología,
Universidad de Sevilla

Evolución en una botella

ARN replicantes hacen que la ciencia dé un nuevo paso hacia la vida artificial

Gerald F. Joyce admite que, cuando vio los resultados del experimento, estuvo tentado de interrumpir los trabajos y publicar inmediatamente los hallazgos obtenidos. Después de años de intentos, él y su alumno Tracey Lincoln habían encontrado un par de secuencias de ARN, cortas pero poderosas, que, al unirse a un caldo de sencillos bloques constructivos de ARN, se duplicaban una y otra vez; se multiplicaban por diez en unas pocas horas y se reproducían de forma continua mientras dispusieran de espacio y de materia prima.

Sin embargo, Joyce no estaba plenamente satisfecho. Este químico de 53 años, profesor y decano del Instituto de Investigación de La Jolla, California, es uno de los creadores de la hipótesis del "mundo de ARN". Se trata de la noción de que la vida tal como la conocemos, la vida basada en el ADN y en proteínas enzimáticas, con el ARN como mensajero de la información genética, se desarrolló evolutivamente a partir de un sistema químico prebiótico más sencillo, basado principalmente, si no únicamente, en el ARN.

De la vida en tubos de ensayo a las herramientas de diagnóstico

Crear vida en el laboratorio constituiría un acontecimiento extraordinario para la humanidad, aun cuando fuera una vida más molecular que frankensteiniana. Sin embargo, los procesos químicos descubiertos podrían tener usos más prosaicos. Gerald F. Joyce señala que su laboratorio del Instituto Scripps de Investigación en La Jolla, ha modificado los replicadores de ARN para que cumplan una función bioquímica necesaria en la reproducción. En su opinión, los ganadores de esa carrera evolutiva serán buenos candidatos para el diagnóstico médico. Scott K. Silverman, de la Universidad de Illinois, considera que se trata de una hipótesis valiosa: "Supongamos que necesitamos detectar algo en un entorno sucio, con muchos productos químicos presentes, por ejemplo encontrar *Salmonella* en la mantequilla de cacahuete. Es algo muy difícil de hacer sin etapas sucesivas de purificación; resultaría muy útil poder desarrollar evolutivamente el sistema de diagnóstico capaz de hallar la señal entre el ruido ambiente".

Por supuesto, la idea sólo es plausible si el ARN puede constituir un fundamento suficiente en solitario para la evolución. Quizá su ARN sintético podría ayudar a demostrarlo, pensó Joyce. Con Lincoln pasó otro año trabajando con las moléculas, provocándoles mutaciones y creando competiciones en las que sólo las más aptas pudieran sobrevivir.

En enero, un mes antes del bicentenario del nacimiento de Charles Darwin, anunciaron sus resultados en *Science*. Su pequeño sistema contenido en tubos de ensayo mostraba casi todas las características esenciales de la evolución darwinista. Las 24 variantes de ARN iniciales se reprodujeron, algunas más rápidamente que otras, según las condiciones ambientales. Cada especie molecular competía con las demás para conseguir los recursos comunes formados por los bloques constructivos de ARN. Y el proceso de reproducción era imperfecto, de manera que aparecían e incluso prosperaban nuevos mutantes, que Joyce denomina recombinantes.



CREACION DE VIDA: Moléculas de ARN reproductor se ramifican a partir de un tronco central de ADN. Ese ARN muestra la mayoría de los aspectos esenciales de la evolución en un tubo de ensayo. Sin embargo, para constituir vida sintética necesitaría también la capacidad de desarrollar nuevas funciones en el curso de la evolución.

OSCAR L. MILLER *Photo Researchers, Inc.*

“Dejamos que funcionase durante 100 horas”, recuerda Joyce, “durante las cuales se produjo un crecimiento del número de moléculas replicadoras del orden de 10^{23}. Los tipos de replicadores originales se extinguieron rápidamente y los recombinantes comenzaron a dominar la población”. Sin embargo, ninguno de los recombinantes podía hacer algo nuevo, es decir, algo que ninguno de sus antecesores no fuera capaz de hacer.

Ese ingrediente crucial, aunque ausente sigue separando la evolución artificial de la evolución darwinista genuina. “Esto no es vida”, subraya Joyce. “En la vida, se inventan nuevas funciones. Seguimos sin tener eso. Nuestro objetivo es crear vida en el laboratorio; mas para llegar hasta allí hemos de aumentar la complejidad del sistema, de manera que pueda empezar a inventar nuevas funciones, en vez de limitarse a optimizar las funciones que se introdujeron en el sistema al diseñarlo”.

Ese objetivo parece posible porque los replicadores de ARN del laboratorio de Joyce eran bastante simples: cada uno sólo tiene dos secciones, a modo de genes, que puedan variar. Cada uno de estos “genes” es un corto bloque constructivo de ARN. Un replicador, al ser una enzima de ARN, puede tomar ambos genes y unirlos para crear una enzima, la “novia” o “pareja” del replicador. La pareja queda libre y toma dos genes sueltos, con los que forma un gen del replicador original. Los recombinantes aparecen cuando la pareja es “infiel” y une genes que no estaban hechos el uno para el otro. Sin embargo, los recombinantes no crearon genes en el experimento. Quizá sea posible diseñar un sistema en el que eso sí que suceda o añadir complejidad proporcionando a cada replicador más genes con los que trabajar.

Scott K. Silverman, químico de la Universidad de Illinois que ha abierto nuevos caminos de investigación con enzimas que interactúan con el ADN, espera que “detectando la evolución darwinista en nuevas moléculas podamos entender mejor los principios básicos de la evolución biológica”, cuyo dominio molecular sigue, en buena medida, envuelto en el misterio. Joyce y Lincoln, por ejemplo, se dieron cuenta, al revisar los resultados del experimento, de que los tres recombinantes con más éxito habían formado una asociación. Cuando un miembro de la asociación cometía un error de reproducción, el resultado era uno de los otros dos miembros.

El próximo paso importante hacia la creación de vida en el laboratorio, afirma Joyce, consistirá en el diseño o la producción mediante evolución de una serie de moléculas sintéticas que puedan llevar a cabo funciones metabólicas y no sólo reproductivas. El genetista Jack W. Szostak, de la facultad de medicina de Harvard, ha desarrollado proteínas no biológicas que se unen al ATP, una sustancia química que transporta energía y es esencial para el metabolismo. El laboratorio de Szostak también está intentando desarrollar protocélulas que engloben el ARN dentro de micelas, pequeñas esferas de ácidos grasos, que puedan formarse, fusionarse y reproducirse espontáneamente.

Aun cuando los bioquímicos lograsen combinar el ARN y otros compuestos básicos en algún tipo de vida sintética, es probable que el sistema creado fuese inicialmente tan complejo, que a duras penas podría utilizarse como prueba de que la vida natural comenzó de alguna forma similar hace cuatro mil millones de años. Los replicadores de Joyce consisten simplemente en 50 letras químicas o bases, pero la probabilidad de que dicha secuencia apareciera por azar es aproximadamente de una en 10^{30}, señala. “Si estuvieran formados por seis o incluso diez letras, yo diría que estaríamos en el campo de lo verosímil y sería posible imaginar su formación espontánea” en la sopa primordial.

W. Wayt Gibbs

Pérdidas en las atmósferas planetarias

La atmósfera de la Tierra escapa poco a poco al espacio. ¿Llegará nuestro planeta a parecerse a Venus?

David C. Catling y Kevin J. Zahnle

CONCEPTOS BASICOS

- Muchos de los gases de que están hechas las atmósferas de la Tierra y de otros planetas escapan poco a poco al espacio. Los gases calientes, en especial los más ligeros, se evaporan; las reacciones químicas y las colisiones entre partículas expulsan átomos y moléculas; los asteroides y los cometas arrancan en ocasiones bloques enteros de atmósfera.
- Estas fugas gaseosas despejan algunos misterios del sistema solar. Por ejemplo, Marte es rojo porque el vapor de agua se descompuso en hidrógeno y oxígeno; el hidrógeno se perdió, mientras que el de oxígeno de más oxidó —herrumbró— las rocas. Un proceso similar hizo que Venus acumulara dióxido de carbono en una atmósfera espesa; paradójicamente, la enorme atmósfera de Venus resulta de la fuga de gases.

Una de las propiedades más notables del sistema solar es la variedad de las atmósferas planetarias. La Tierra y Venus tienen una masa y un tamaño parecidos. Sin embargo, la superficie de Venus se cuece a unos 460 grados Celsius bajo un océano de dióxido de carbono que ejerce sobre ella tanta presión como si fuera una capa de agua de un kilómetro de espesor. Calisto y Titán, lunas de tamaño planetario de Júpiter y Saturno, respectivamente, tienen dimensiones aproximadas, pero Titán posee una atmósfera rica en nitrógeno, más densa que la nuestra, y Calisto diríase desprovisto de atmósfera.

¿Cuál es la razón de tales extremos? Si lo supiéramos, podríamos explicar por qué la Tierra hierve de vida, mientras que sus hermanos planetarios parecen inertes. Saber cómo evolucionan las atmósferas resulta también esencial para determinar qué planetas fuera del sistema solar podrían ser habitables.

Un planeta adquiere un manto gaseoso de diversas formas: puede desprender vapores desde el interior, puede capturar materiales volátiles de los cometas y asteroides contra los que choque o puede su gravedad atrapar los gases del espacio interplanetario. Pero ya se va comprendiendo que la fuga de gases desempeña una función tan importante como su captura. Aunque la atmósfera de la Tierra pueda parecer tan invariable como las piedras, tiene pérdidas hacia el espacio. La fuga es pequeña hoy en día, apenas tres kilogramos de hidrógeno y 50 gramos de helio (los dos gases más ligeros) por segundo, pero estas cantidades resultan significativas en escalas de tiempo geológico. Es posible que antaño las pérdidas fueran mucho mayores. Tal y como escribió Benjamín Franklin, "una pequeña infiltración puede hundir un barco grande".

Las atmósferas de los planetas terrestres y de los satélites de los planetas exteriores que hoy observamos no son más que ruinas de castillos, lo que queda tras saqueos y degradación. Las atmósferas de los cuerpos más pequeños serían fortines rudimentarios, mal defendidos y muy vulnerables.

El reconocimiento de la importancia de los escapes planetarios cambia nuestra visión del sistema solar. Durante décadas, los científicos han reflexionado sobre la delgada atmósfera de Marte. Hoy nos preguntamos ya cómo es posible que Marte tenga todavía atmósfera. Y otras cuestiones: ¿Es la diferencia entre Calisto y Titán consecuencia de la pérdida de atmósfera de Calisto y no de que Titán se formara en un entorno más gaseoso? ¿Fue la atmósfera de Titán más espesa antaño? ¿Cómo se aferró Venus tan tenazmente a su nitrógeno y dióxido de carbono y perdió por completo el

1. LA PERDIDA DE CIERTOS GASES, en especial el hidrógeno, ha transformado a la Tierra. Es una de las razones de que se acumulase oxígeno en la atmósfera. En el futuro, la desaparición de hidrógeno secará nuestros océanos y frenará los ciclos geológicos que estabilizan el clima. La vida aún sería posible, quizás, en las regiones polares.

ALFRED T. KAMAJIAN

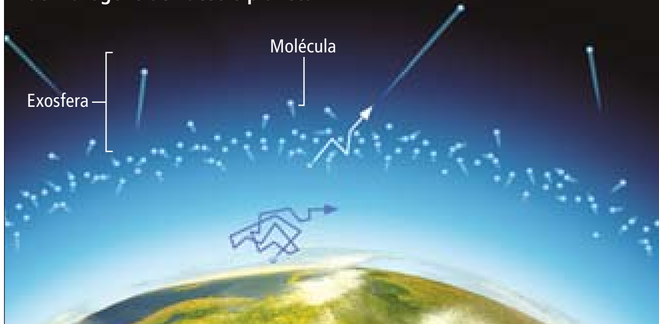
LA TIERRA DEL PASADO: HACE 3000 MILLONES DE AÑOS



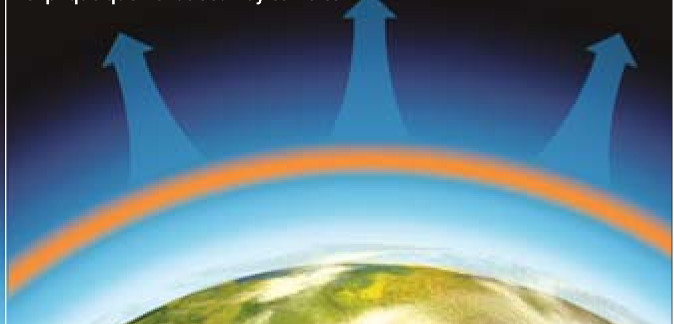
LA TETERA PLANETARIA

Una de la principales causas de la pérdida de aire es el calentamiento solar. El calor puede expulsar aire en una de las dos formas siguientes.

EL AIRE SE EVAPORA MOLECULA A MOLECULA
En la capa más alta de la atmósfera, o exosfera, nada impide que los átomos y las moléculas más rápidos vuelen hacia el espacio. Este proceso, llamado escape de Jeans, explica gran parte de las pérdidas de hidrógeno de nuestro planeta.



EL AIRE CALIENTE ESCAPA COMO VIENTO
El aire calentado por la luz solar asciende, se acelera y alcanza la velocidad de escape. Este proceso de escape hidrodinámico adquirió una importancia sobresaliente en la Tierra y Venus primitivos; quizás explique que Venus sea hoy como es.





2. LAS PRUEBAS DEL ESCAPE TERMICO se siguen de qué planetas y satélites conservan atmósferas y cuáles no. El factor decisivo parece ser la intensidad del calentamiento solar (*eje vertical*) relativa a la intensidad de la gravedad del astro (*eje horizontal*). Los mundos sin aire sufren un mayor calentamiento y tienen una menor gravedad (*a la izquierda de la línea*). Los cuerpos con atmósfera presentan un menor calentamiento y una mayor gravedad (*a la derecha de la línea*).

agua? ¿Ayudó la fuga de hidrógeno a establecer el orden de cosas en que apareció la vida compleja en la Tierra? ¿Convertirá algún día a nuestro planeta en otro Venus?

Cuando el calor está activo

Una nave espacial alcanza la velocidad de escape cuando se mueve a velocidad suficiente para liberarse de la gravedad del planeta. Lo mismo se aplica a los átomos y a las moléculas, aunque no lleguen a sus velocidades de escape animadas por un propósito. En un escape térmico, los gases se calientan demasiado para que el planeta los retenga. En los procesos no térmicos, las reacciones químicas o de partículas dotadas de carga expelen átomos y moléculas. Y en un tercer tipo de proceso, los impactos de asteroides y cometas expulsan con violencia el aire.

El escape térmico es el más común y directo de los tres. Todos los cuerpos del sistema solar se caldean por la luz del Sol. Se desprenden de ese calor de dos maneras: emitiendo radiación infrarroja y derramando materia. En los cuerpos más longevos, como la Tierra, prevalece el primer mecanismo; en otros, como los cometas, domina el segundo. Incluso un cuerpo del tamaño de la Tierra se puede calentar rápidamente si la absorción y la radiación se desequilibran; la atmósfera —que tiene menos masa que el resto del planeta— se evaporaría entonces en un instante cósmico. Nuestro sistema solar está plagado de cuerpos sin aire; la fuga térmica parece ser la causa más común. Los cuerpos sin atmósfera se distinguen porque en ellos el calentamiento solar supera un límite concreto, que depende de la fuerza de gravedad del cuerpo (*véase el recuadro* “La tetera planetaria”).

El escape térmico sucede de dos formas. En la primera, denominada escape de Jeans en honor de James Jeans, astrónomo inglés que la describió a principios del siglo XX, el aire se evapora literalmente átomo a átomo, molécula a molécula, en las capas altas de la atmósfera. A bajas altitudes, las colisiones confinan a las partículas, pero más allá de una determinada altura, la llamada exobase, que en la Tierra es de unos 500 kilómetros por encima de la superficie, el aire se hace tan tenue, que las partículas de gas apenas chocan entre sí. Nada impide que un átomo o molécula, dotados de suficiente velocidad, naveguen hacia el espacio.

El gas más ligero, el hidrógeno, es el que más fácilmente supera la gravedad planetaria.

GEORGE RETSECK (*ilustración*); ALFRED T. KAMAJIAN (*gráfica*)

Pero antes ha de alcanzar la exobase, proceso que en la Tierra lleva tiempo. Las moléculas que contienen hidrógeno tienden a no ascender por encima de la capa más baja de la atmósfera: el vapor de agua (H_2O) se condensa y precipita en forma de lluvia, el metano (CH_4) se oxida para generar dióxido de carbono (CO_2). Sin embargo, algunas moléculas de agua y metano alcanzan la estratosfera, se descomponen y liberan el hidrógeno, que lentamente se difunde hacia arriba, hasta llegar a la exobase. No cabe duda de que una cantidad pequeña se fuga de la Tierra: las imágenes ultravioleta revelan que un halo de átomos de hidrógeno rodea a nuestro planeta (*véase la figura 3*).

La temperatura de la exobase terrestre oscila, pero viene a estar en torno a los 1000 kelvin, lo que hace que los átomos de hidrógeno tengan una velocidad media de 5 kilómetros por segundo. Este valor es inferior a la velocidad de escape de la Tierra (10,8 kilómetros por segundo) a esa altura. La media oculta, no obstante, un amplio rango, por lo que algunos átomos de hidrógeno sí se liberan de la gravedad del planeta. Esta pérdida de partículas procedentes de la cola energética de la distribución de velocidades explica del 10 al 40 por ciento de la pérdida actual de hidrógeno terrestre. El escape de Jeans forma también parte de la explicación de que la Luna no tenga aire. Los gases liberados de la superficie lunar se evaporan fácilmente hacia el espacio.

Un segundo tipo de escape térmico es bastante más espectacular. Mientras el escape de Jeans sucede molécula a molécula, el aire caliente puede fluir en masa. La alta atmósfera absorbe radiación ultravioleta del Sol, se calienta y expande a la vez que empuja aire hacia arriba. Al ascender, el aire se acelera suavemente, supera la velocidad del sonido y alcanza la velocidad de escape. Este mecanismo de filtración térmica recibe el nombre de escape hidrodinámico, o viento planetario, en analogía al viento solar, la corriente de partículas cargadas que se desprende del Sol y se adentra en el espacio interplanetario.

Polvo en el viento

Las atmósferas ricas en hidrógeno son las más vulnerables al escape hidrodinámico. El hidrógeno que fluye hacia fuera puede atrapar y arrastrar consigo otros átomos y moléculas más pesadas. Al igual que el viento del desierto transporta partículas de polvo a través de los océanos y granos de arena de duna a duna, dejando tras de sí guijarros y cantos rodados, el viento de hidrógeno transporta moléculas y átomos a un ritmo que disminuye con el peso. Por tanto, la composición actual de una atmósfera puede reflejar si este proceso ha ocurrido alguna vez.



3. LAS FILTRACIONES DE ATOMOS DE HIDROGENO aparecen como un brillo rojizo en esta imagen ultravioleta del lado nocturno de la Tierra, tomada por el satélite Explorador Dinámico I de la NASA en 1982. El oxígeno y el nitrógeno crean la banda alrededor del polo norte y los mechones en el trópico.

NASA/UNIVERSIDAD DE IOWA

Se han observado signos de una filtración hidrodinámica fuera del sistema solar en el planeta de tipo joviano HD 209458b. Con el telescopio espacial Hubble, Alfred Vidal-Madjar, del Instituto de Astrofísica de París, y sus colaboradores descubrieron en 2003 que este planeta gozaba de una atmósfera expandida de hidrógeno. Las mediciones realizadas revelaron también carbono y oxígeno en la atmósfera inflada. Estos átomos son demasiado pesados para escapar por sí solos: han debido de ser arrastrados hasta allí por el hidrógeno. La pérdida hidrodinámica explicaría, además, por qué los astrónomos no encuentran planetas grandes mucho más cercanos a sus estrellas que HD 209458b. En los planetas con órbitas de menos de tres millones de kilómetros (la mitad de la separación orbital de HD 209458b), el escape hidrodinámico rompería por completo las atmósferas planetarias en menos de unos miles de millones de años; quedaría sólo un resto abrasado.

Este indicio de vientos planetarios da crédito a las ideas expuestas en los años ochenta sobre el escape hidrodinámico de los antiguos Venus, Marte y Tierra. Hay tres pistas que sugieren que este proceso sí sucedió antaño en estos mundos. La primera concierne a los gases nobles. Sin pérdidas, los gases químicamente no reactivos, como el neón y el argón, deberían permanecer en la atmósfera indefinidamente. Las concentraciones de sus isótopos deberían ser similares a los valores originales, que a su vez deberían parecerse a los del Sol, por compartir un origen común en la nebulosa solar. Sin embargo, son diferentes.

Segundo, las estrellas jóvenes constituyen poderosas fuentes de luz ultravioleta, y nuestro Sol no fue una excepción. Esta radiación pudo provocar el escape hidrodinámico.

Tercero, es posible que los planetas terrestres primitivos contaran con atmósferas ricas en hidrógeno, que provendría de las reacciones químicas del agua con el hierro, de los gases de la nebulosa o de las moléculas de agua rotas por la radiación ultravioleta solar. En aquellos días primitivos, los asteroides y los cometas golpeaban los planetas con mucha frecuencia; cada vez que daban contra los océanos, llenaban la atmósfera de vapor. En el transcurso de miles de años, el vapor se condensaría para caer en forma de lluvia de nuevo sobre la superficie, pero Venus se halla tan cerca del Sol, que el vapor de agua pudo haber subsistido en la atmósfera, y allí la radiación solar lo descompondría.

El escape hidrodinámico funcionaría fácilmente en las condiciones reseñadas. En los

años ochenta, James F. Kasting, hoy en la Universidad estatal de Pennsylvania, probó que la fuga hidrodinámica de Venus se habría llevado el equivalente a un océano de hidrógeno en apenas unas decenas de millones de años [*véase* "Evolución del clima en los planetas terrestres", por James F. Kasting, Owen B. Toon y James B. Pollack; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1988]. Kasting y uno de los autores (Zahnle) mostraron después la posibilidad de que el hidrógeno escapado arrastrase consigo gran parte del oxígeno, dejando tras de sí el dióxido de carbono. Sin agua que medie en las reacciones químicas que convierten el dióxido de carbono en minerales carbonatados, en caliza, el dióxido se fue acumulando en la atmósfera hasta convertir Venus en el infierno que vemos hoy día.

En un menor grado, Marte y la Tierra parecen haber padecido pérdidas hidrodinámicas. La prueba es el déficit de los isótopos más ligeros, los que se pierden con mayor facilidad. En las atmósferas terrestre y marciana la razón de neón 20 a neón 22 es un 25 por ciento inferior a la razón solar. En Marte, el argón 36 está mermado con respecto al argón 38 en una proporción parecida. Los propios isótopos de xenón —el gas más pesado en la Tierra aparte de los contaminantes— muestra huellas de escape hidrodinámico. Si la fuga hidrodinámica adquirió tal intensidad que barrió el xenón, ¿por qué no acabó con todo lo demás a la vez? Para recomponer semejante rompecabezas, quizá se deba construir una historia para el xenón diferente de la de los otros gases que ahora perduran en la atmósfera.

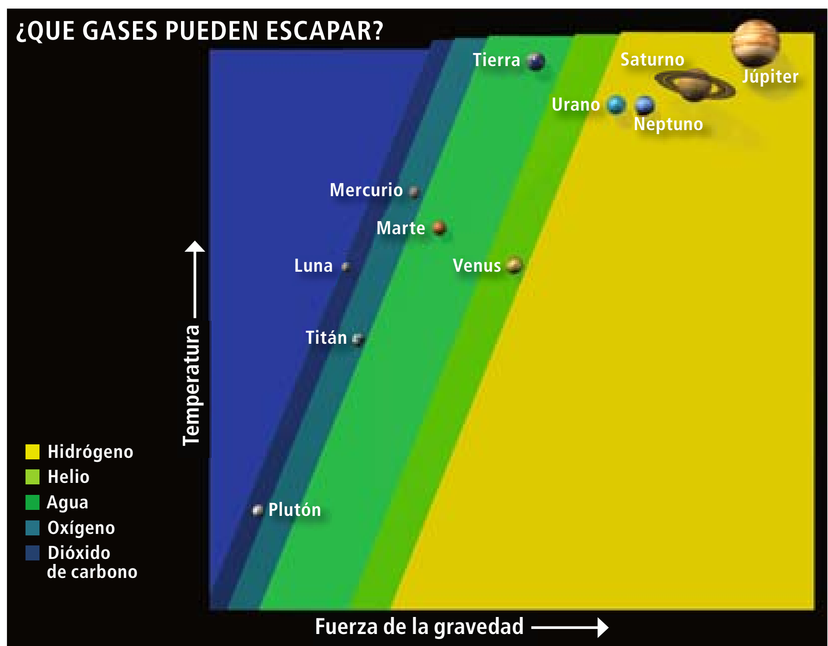
El escape hidrodinámico pudo haber despojado a Titán de gran parte de su aire. En su descenso por la atmósfera de Titán en el año 2005, la sonda Huygens, de la Agencia Espacial Europea, midió una razón de nitrógeno 14 a nitrógeno 15 igual a un 70 por ciento de la razón terrestre. Se trata de una disparidad gigantesca, si se tiene en cuenta que los dos isótopos sólo difieren un poco en su tendencia a escapar. Si la atmósfera de Titán comenzó con la misma cantidad isotópica de nitrógeno que la Tierra, debe haber perdido montos enormes de nitrógeno —varias veces la cantidad presente hoy día, que es muy considerable— para que la razón isotópica haya decrecido hasta su valor actual. En resumen, la atmósfera de Titán pudo haber sido antaño incluso más densa que ahora. El misterio se torna más enrevesado.

Mejor escapar con la química

En algunos planetas, incluyendo la Tierra del presente, la pérdida térmica es menos importante que el escape no térmico. En la fuga no térmica, las reacciones químicas o las colisiones de partículas catapultan los átomos a velocidades de escape. Los mecanismos de fuga no térmica tienen en común que un átomo o molécula alcanza una velocidad alta como resultado de un suceso que acontece por encima de la exobase, por lo que chocar contra algo no frustra los planes del fugitivo. En muchos de los tipos de escape no térmico están involucrados los iones. Normalmente, estas partículas dotadas de carga se encuentran ligadas a los planetas por los campos magnéticos planetarios —si existen— o por los campos localizados inducidos por el paso del viento solar. Pero hallan caminos para huir.

En el suceso conocido como intercambio de carga, un ion rápido de hidrógeno colisiona con un átomo de hidrógeno neutro y captura su electrón. El resultado es un átomo de hidrógeno neutro rápido inmune al campo magnético. Este proceso explica del 60 al 90 por ciento de la pérdida actual de hidrógeno en la Tierra y la mayor parte del hidrógeno perdido en Venus.

Otro mecanismo de fuga explota un punto débil —un resquicio, nos atrevemos a decir— de la trampa magnética del planeta. La mayoría de las líneas del campo magnético viajan desde un polo magnético al otro polo, pero las líneas más anchas son arrastradas por el vien-



4. LOS GASES LIGEROS, el hidrógeno por ejemplo, son más libres que los pesados, como el oxígeno. Su propensión a experimentar el escape de Jeans depende de la temperatura en las capas altas de la atmósfera de los astros, o, para los cuerpos sin aire como la Luna, en la superficie (*eje vertical*), y de la fuerza de la gravedad (*eje horizontal*). Si un astro se encuentra a la derecha de la línea correspondiente a un gas, lo preserva; si a la izquierda, lo pierde. Así, Marte pierde hidrógeno y helio, retiene oxígeno y dióxido de carbono, y conserva agua a duras penas.

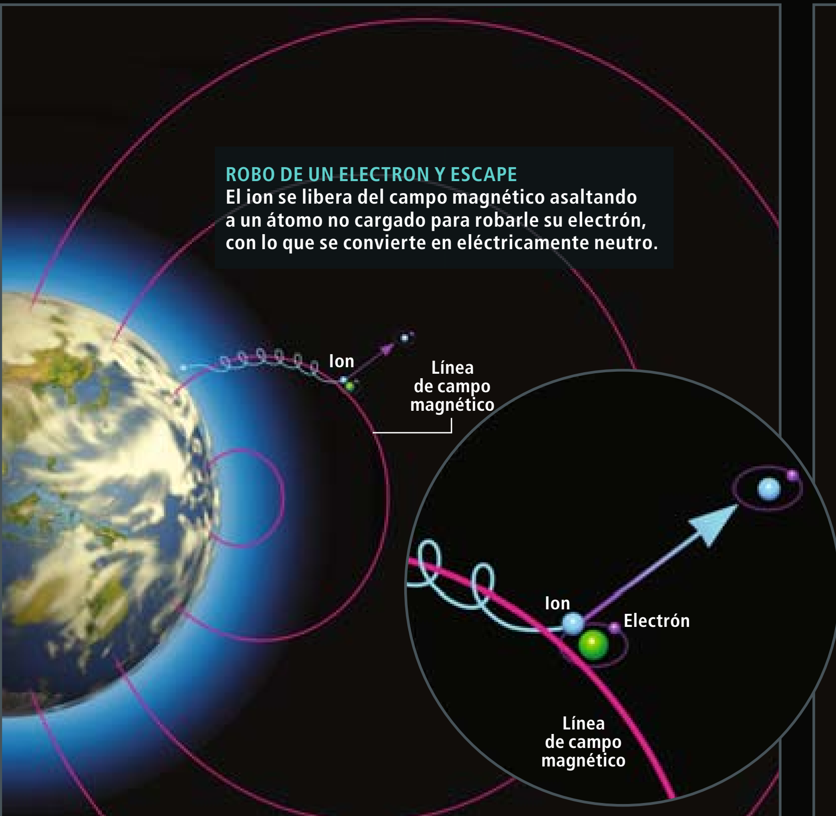
ALFRED T. KAMAJIAN (*gráfica*); GEORGE RETSECK (*ilustración*)

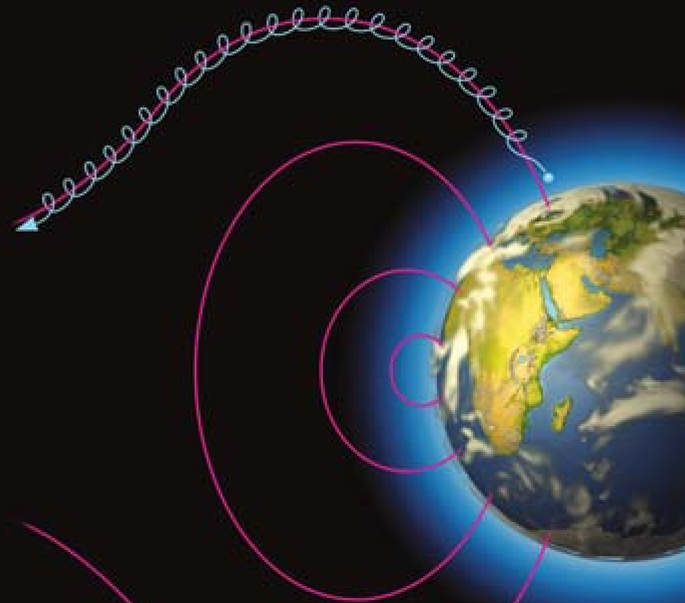
Los autores

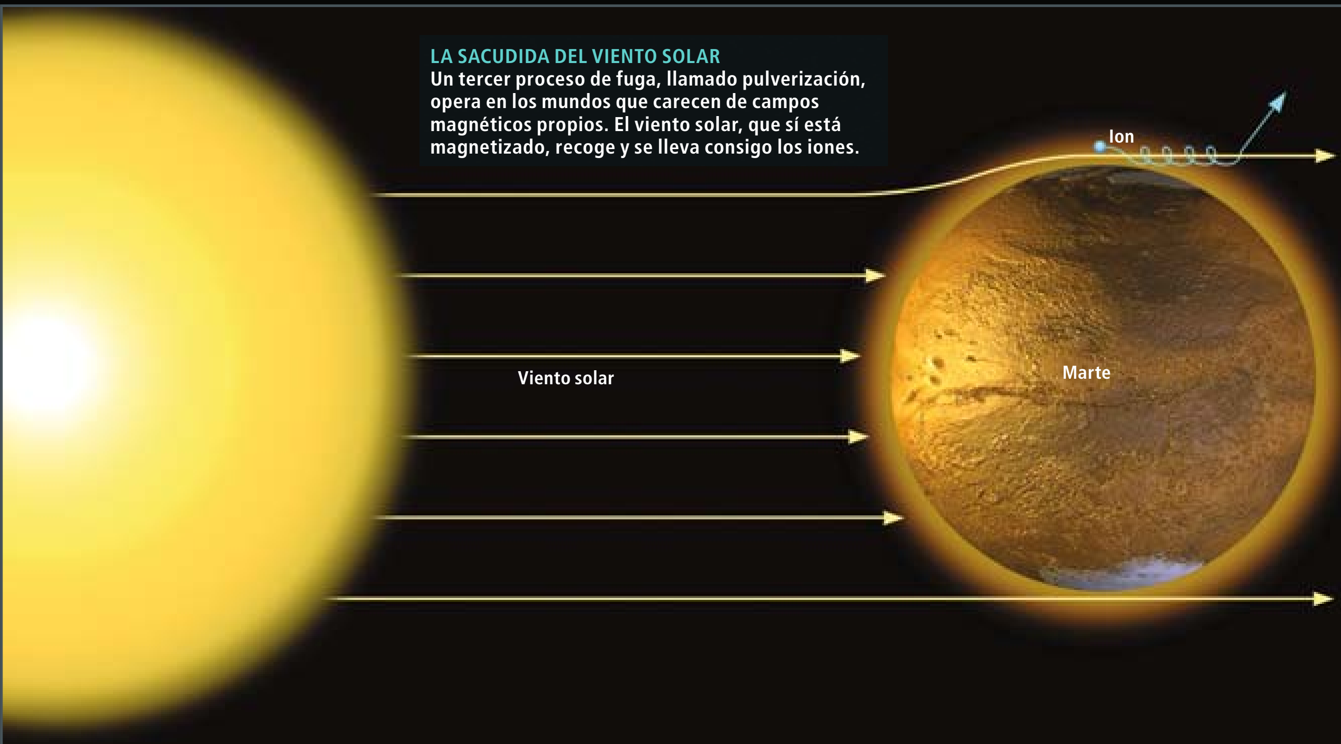
David C. Catling, experto en planetología, estudia la evolución conjunta de las superficies planetarias y las atmósferas. Del Centro de Investigación NASA-AMES pasó al claustro docente de la Universidad de Washington en 2001. Es coinvestigador de la sonda Phoenix de la NASA, que completó su misión el pasado diciembre. **Kevin J. Zahnle** ha sido investigador del Centro de Investigación NASA-AMES desde 1989. Estudia los interiores, las superficies y las atmósferas de los planetas. En 1996 recibió la medalla de logros excepcionales de la NASA por su trabajo sobre el impacto del cometa Shoemaker-Levy 9 en Júpiter.

Las partículas que huyen

La segunda forma de que el aire escape es gracias a las reacciones de las partículas dotadas de carga. Los campos eléctricos aceleran los iones hasta la velocidad de escape. Aunque el campo magnético del planeta los atrapa, disponen de varias vías de fuga.







IMPACTOS

Cuando un cometa o un asteroide choca contra un planeta, puede ocasionar una gran explosión que arroje piedras, agua, dinosaurios y aire al espacio.





LA EROSION DE IMPACTO será más severa si el astro que recibe el impacto tiene poca gravedad (*eje horizontal*) y si los asteroides o cometas chocan con él a gran velocidad (*eje vertical*). Los objetos sin aire tienden a estar por encima y a la izquierda de la gráfica, donde la erosión es peor. (La fuerza de la gravedad fija una velocidad mínima de impacto, por lo que la zona verdosa representa un rango de velocidades que jamás se pueden dar en la naturaleza.)

to solar y no se cierran; permanecen abiertas al espacio interplanetario. Los iones pueden escapar a través de esa puerta abierta. No obstante, deben superar la fuerza de la gravedad; sólo los más ligeros, como el hidrógeno y el helio, tienen éxito. La corriente resultante de partículas dotadas de carga, el llamado viento polar (que no ha de confundirse con el viento planetario), explica del 10 al 15 por ciento del hidrógeno que pierde la Tierra y casi toda la fuga de helio.

En algunos casos, estos iones ligeros pueden llevarse consigo a otros más pesados. Este proceso explicaría el problemático caso del xenón: si el viento polar fue más poderoso en el pasado, quizás arrastrase iones de xenón. Un dato a tener en cuenta es que el kriptón no tiene el mismo patrón isotópico que el xenón, aun siendo un gas más ligero e idéntico en todo lo demás, por lo que debería ser más propenso a fugarse. La diferencia es que el kriptón, al contrario que el xenón, se resiste a la ionización, así que ni siquiera le afectará un viento polar intenso.

Un tercer proceso no térmico, el escape fotoquímico, opera en Marte y quizá también en Titán. Las moléculas de oxígeno, nitrógeno y monóxido de carbono penetran en la alta atmósfera, donde la radiación solar las ioniza. Cuando las moléculas ionizadas se recombinan con los electrones o chocan entre ellas, la energía liberada las divide en átomos que tienen velocidad suficiente para escapar.

Marte, Titán y Venus carecen de campos magnéticos globales, por lo que también son vulnerables ante un cuarto proceso no térmico, la pulverización. Sin un campo planetario que la proteja, la alta atmósfera de cada uno de estos mundos queda expuesta a toda la furia del viento solar. El viento capta iones, que con el tiempo intercambian cargas y escapan. La atmósfera marciana es rica en nitrógeno pesado e isótopos de carbono, lo que sugiere que ha perdido una cantidad equivalente al 90 por ciento de la atmósfera primitiva. La pulverización y el escape fotoquímico son los responsables más probables. Para el año 2013, la NASA ha proyectado lanzar la Misión de Evolución de Volátiles y Atmósfera de Marte (MAVEN, sus siglas en inglés), que ha de medir los iones y los átomos neutros escapados y reconstruir la historia atmosférica del planeta.

Consecuencias inevitables

Las pérdidas térmicas y no térmicas apenas son un mero goteo si se comparan con el enorme derrame que se produce cuando cometas o asteroides chocan contra los planetas. Si los proyectiles son lo suficientemente rápidos y grandes, se vaporizarán ellos mismos y una parte de la superficie planetaria de masa semejante a la del cuerpo que impacte. La subsiguiente llamarada de gas caliente se expandirá a una velocidad mayor que la de escape y arrastrará consigo el aire suprayacente. Cuanta mayor sea la energía del impacto, mayor será el cono atmosférico expulsado. El cono del asteroide que acabó con los dinosaurios hace 65 millones de años tuvo un ángulo de 80 grados desde la vertical y abarcó la cienmilésima parte de la atmósfera terrestre. Un choque aún mayor podría haberse llevado toda la atmósfera por encima del plano tangente al planeta.

Otro factor determinante de la anchura del cono es la densidad atmosférica. Cuanto más fino es el aire, más atmósfera se pierde. Las implicaciones son sombrías: una vez que una atmósfera vulnerable empieza a evaporarse, a los impactos les cuesta cada vez menos erosionar la

GEORGE RETSECK (*ilustración*); ALFRED T. KAMAJIAN (*gráfica*)

atmósfera, hasta que desaparece por completo. Marte pasó su juventud en un distrito peligroso, cerca del cinturón de asteroides, y, siendo tan pequeño, resultó especialmente vulnerable. En función de la distribución de tamaños de los bólidos en los primeros tiempos de un sistema solar, debería haberse quedado sin su atmósfera en menos de 100 millones de años.

Las grandes lunas de Júpiter habitan también en barrios expuestos: dentro del campo gravitatorio del planeta, que acelerará cualquier asteroide o cometa que se acerque. Los impactos deberían haber desnudado a estas lunas, quitándoles cualquier atmósfera que hubieran tenido. Por el contrario, Titán orbita comparativamente más lejos de Saturno, donde las velocidades de los impactos son menores y donde una atmósfera podría sobrevivir.

De todas estas maneras, el escape explica la gran diversidad de atmósferas, desde la ausencia de aire en Calisto y Ganímedes hasta la falta de agua en Venus. Una consecuencia más sutil del escape atmosférico es que tiende a oxidar los planetas, debido a que el hidrógeno se pierde más fácilmente que el oxígeno. La fuga de hidrógeno es la razón última de que Marte, Venus e incluso la Tierra sean rojos. No se suele considerar a la Tierra un planeta rojo, pero gran parte de la corteza continental es de ese color. El suelo y la vegetación esconden el verdadero color. Los tres planetas empezaron teniendo el color gris negruzco de la roca volcánica y se enrojecieron a medida que los minerales originales se oxidaron y convirtieron en óxidos de hierro (parecidos al orín). Para explicar su color, Marte tiene que haber perdido un océano de agua equivalente a una capa global de unos metros o decenas de metros de profundidad.

Se atribuye a los organismos fotosintéticos la acumulación de oxígeno en la Tierra hace 2400 millones años, pero en 2001 apuntamos que la fuga de hidrógeno pudo también desempeñar entonces un papel importante. Los microorganismos rompen las moléculas de agua en los procesos de fotosíntesis; el hidrógeno pasa de la materia orgánica al metano, que con el tiempo escapa al espacio. La cantidad de hidrógeno que se perdería coincide con el exceso neto de material oxidado presente en la Tierra actual.

La fuga gaseosa ayuda a resolver el misterio de la rala atmósfera de Marte. Existe desde hace tiempo la hipótesis de que las reacciones químicas entre el agua, el dióxido de carbono y las rocas convirtieron en minerales carbona-

Rosario de pérdidas

Los tres mecanismos de fuga de gases actúan en un grado diferente en los distintos planetas y en varios momentos de su historia.

ASTRO	PERIODO	GASES CLAVE FUGADOS	TERMICO: ESCAPE DE JEANS	TERMICO: HIDRO-DINAMICO	NO TERMICO: INTERCAMBIO DE CARGA	NO TERMICO: VIENTO POLAR	NO TERMICO: FOTO-QUIMICO	NO TERMICO: VAPORIZACION	IMPACTO
Tierra	Ahora	Hidrógeno	✓		✓	✓			
		Helio			✓	✓			
	Primordial	Hidrógeno, neón		✓					
Venus	Ahora	Hidrógeno, helio			✓			✓	
	Primordial	Hidrógeno, oxígeno		✓					
Marte	Ahora	Hidrógeno	✓						
		Carbono, oxígeno, nitrógeno, argón					✓	✓	
	Primordial	Todos los gases							✓
		Hidrógeno, dióxido de carbono		✓					
Satélites de Júpiter	Primordial	Todos los gases		✓					✓
Titán	Ahora	Hidrógeno	✓					✓	
		Metano, nitrógeno		?				✓	✓
	Primordial	Hidrógeno, metano, nitrógeno		✓					
Plutón	Ahora	Hidrógeno, metano, nitrógeno		?					
HD 209458b	Ahora	Hidrógeno, carbono, oxígeno		✓					

tados una atmósfera que en un principio fue densa. Los carbonatos nunca se reciclaron en dióxido de carbono gaseoso porque, siendo Marte tan pequeño, se enfrió enseguida y se acabaron las erupciones de volcanes. El problema de esta teoría es que las naves espaciales sólo han encontrado por ahora una pequeña región con rocas carbonatadas; el afloramiento de marras se generaría, con toda probabilidad, en aguas templadas subterráneas. Es más, la teoría de los carbonatos no ofrece ninguna solución a la escasez de nitrógeno y gases nobles de Marte. El escape de gases ofrece explicaciones más convincentes. La atmósfera no se convirtió en rocas; se disipó en el espacio.

Un problema aún abierto: la erosión por impacto debería haber eliminado toda la atmósfera de Marte. ¿Qué lo impidió? Una opción es la pura casualidad. Los grandes impactos son raros y su frecuencia decayó mucho hace 3800 millones de años, por lo que Marte pudo haberse librado del último y devastador gran impacto. El choque de un gran asteroide helado o cometa quizá depositase más volátiles de los que subsiguientes impactos pudiesen eliminar. O quizá sobreviviesen restos de una atmósfera marciana bajo la superficie y, tras el fin de los bombardeos, se fueran filtrando hacia el exterior.

La Tierra parece, en comparación, menos afectada por los escapes, pero eso cambiará. Hoy, la fuga de hidrógeno es apenas un goteo porque el principal contenedor de este gas, el vapor de agua, se condensa en la baja atmósfera y cae, convertido en lluvia, sobre la superficie. Pero el brillo de nuestro Sol irá aumentando poco a poco, a un ritmo de un diez por ciento cada mil millones de años. Esto, imperceptible a las escalas temporales humanas, es devastador a escalas geológicas. Con el Sol más brillante y la atmósfera terrestre cada vez más caliente, ésta se volverá más húmeda, y el goteo del hidrógeno se hará un torrente.

Se piensa que este proceso tendrá importancia cuando el Sol brille un diez por ciento más —es decir, en mil millones de años—, y sólo harán falta otros mil millones de años más para desecar los océanos. La Tierra se convertirá en un planeta desierto, con un casquete polar mermado y con apenas trazas del precioso líquido. Dos mil millones de años más tarde, el Sol golpeará sin piedad a nuestro planeta; hasta los oasis polares desaparecerán, las últimas gotas de agua se evaporarán y el efecto invernadero llegará a derretir las rocas. El destino de la Tierra será el de Venus: un yermo sin vida.

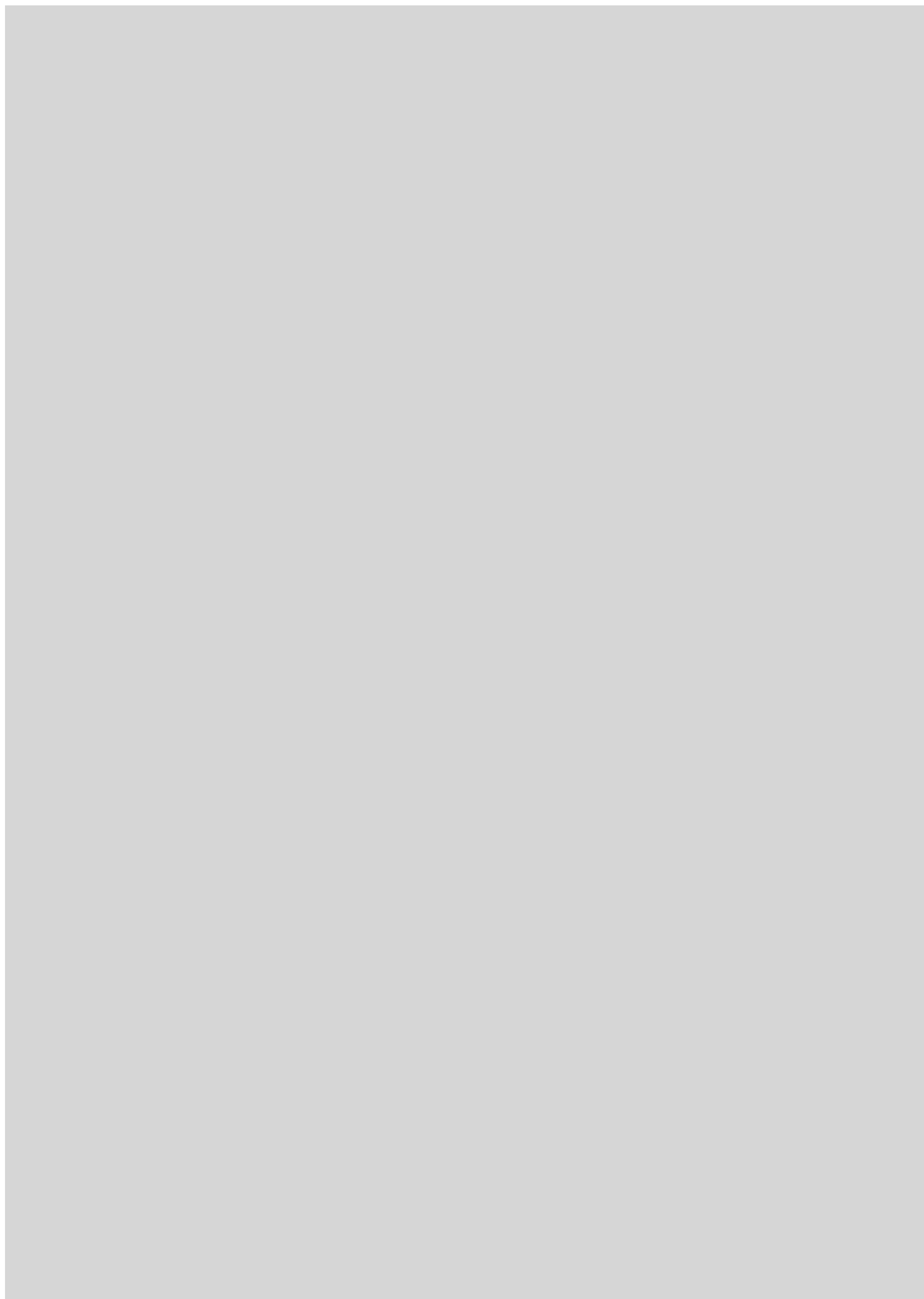
Bibliografía complementaria

ORIGINS OF ATMOSPHERES. K. J. Zahnle en *Origins*. Dirigido por C. E. Woodward, J. M. Shull y H. A. Thronson. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 148; 1998.

AN EXTENDED UPPER ATMOSPHERE AROUND THE EXTRASOLAR PLANET HD209458b. Alfred Vidal-Madjar y cols. en *Nature*, vol. 422, págs. 143-146; 13 de marzo, 2003.

PLANETARY ATMOSPHERES AND LIFE. D. C. Catling y J. F. Kasting en *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*, dirigido por W. T. Sullivan y J. A. Baross. Cambridge University Press, 2007.

ALFRED T. KAMAJIAN (*iconos*)



¿QUE NOS HACE HUMANOS?

La comparación del genoma humano con el de chimpancé ha revelado cuán pocos fragmentos de ADN son exclusivamente humanos

Katherine S. Pollard

Hace seis años se me presentó la oportunidad de incorporarme a un grupo internacional que se proponía identificar la secuencia de las bases, o "letras", del ADN del genoma del chimpancé (*Pan troglodytes*). Como bioestadística que siempre ha sentido interés por el origen de los humanos, estaba deseosa de yuxtaponer la secuencia de ADN humana y la de nuestro pariente vivo más cercano, para compararlas. Una simple verdad emergió: nuestro ADN y el del chimpancé son idénticos en casi un 99 por ciento. Es decir, de los tres mil millones de letras que componen el genoma humano, sólo 15 millones, menos de un 1 por ciento, han sufrido algún cambio desde que el linaje de los chimpancés y el de los humanos divergieron hace unos seis millones de años.

La teoría evolutiva sostiene que el efecto de la inmensa mayoría de estos cambios es pequeño o nulo en nuestra biología. Sin embargo, entre estos 15 millones de bases se encuentran las diferencias que nos hacen humanos. Mi determinación era encontrarlas. Desde entonces, con otros colegas he realizado progresos alentadores en la identificación de las secuencias de ADN que nos separan de los chimpancés.

Una sorpresa inicial

Aunque sean un pequeño porcentaje del genoma humano, buscar esas secuencias a lo largo de millones de bases significa explorar un territorio inmenso. Para facilitar la tarea, escribí un programa informático que examina el código del genoma humano y detecta aquellos fragmentos de ADN que más han cambiado desde que se separaron los humanos y los chimpancés de su antepasado común. Debido a que muchas de las mutaciones genéticas aleatorias no son ni beneficiosas ni dañinas para el organismo, se acumulan a una tasa uniforme que refleja el tiempo que ha pasado desde que dos especies divergieron del ancestro en cuestión. A esa tasa de cambio se la conoce por "tic-tac del reloj molecular".

La aceleración de la tasa de cambio en algún lugar del genoma supone una marca de selección positiva: las mutaciones que permiten a un organismo sobrevivir o reproducirse se transmiten con mayor probabilidad a las generaciones futuras. Es decir, las partes del código que han sufrido las mayores modificaciones desde que se separaron los humanos y chimpancés son las secuencias que más probablemente han moldeado a la especie humana.

En noviembre de 2004, tras meses de depuración y optimización del programa, se ejecutó en una agrupación de ordenadores interconectados (un *cluster*) de la Universidad de California en Santa Cruz. Generó un archivo que contenía una lista con las secuencias de evolución rápida. Con David Haussler, mi tutor, observé que encabezaba la lista cierta región de 118 bases, a la que se denominaría "región acelerada humana 1" (HAR1, del inglés *human accelerated region* 1).

Con el navegador genómico de la Universidad de California en Santa Cruz, una herramienta de visualización que anota el genoma humano con información de bases de datos públicas, amplié la región HAR1. El visualizador mostró la secuencia HAR1 de los genomas de vertebrados que se habían secuenciado hasta ese momento: humano, de chimpancé, de ratón, de rata y de gallo. Aunque nadie la había estudiado o puesto nombre antes, reveló también que experimentos previos de rastreo

CONCEPTOS BASICOS

- Los chimpancés son los parientes vivos más cercanos a los humanos: comparten el 99 por ciento de nuestro ADN.
- El intento de identificar las regiones del genoma humano que más han cambiado desde que los chimpancés y los humanos divergieron a partir de un antepasado común ha permitido localizar las secuencias de ADN que nos hacen humanos.
- Los nuevos hallazgos han aportado también indicios de máximo interés sobre la razón de que chimpancés y humanos difieran tanto, pese a contar con genomas casi idénticos.



JAMES BALOG *Getty Images*

1. LA DIFERENCIA DEL 1 POR CIENTO: Los humanos difieren de los chimpancés en muchos aspectos importantes, a pesar de compartir casi el 99 por ciento de su genoma. Los nuevos análisis revelan qué partes del genoma son las privativas de nuestra especie.

a gran escala habían detectado actividad de la secuencia HAR1 en dos muestras de neuronas humanas. Exclamamos al unísono nuestro asombro al ver que HAR1 podría formar parte de un nuevo gen hasta entonces desconocido, un gen activo en el cerebro.

Nos tocó "el gordo". El cerebro humano difiere notablemente del cerebro del chimpancé en tamaño, organización y complejidad. Pero se sabe muy poco de los mecanismos del desarrollo y los procesos evolutivos que subyacen a las características distintivas del cerebro humano. HAR1 tenía el potencial de iluminar ese aspecto tan misterioso de la biología humana.

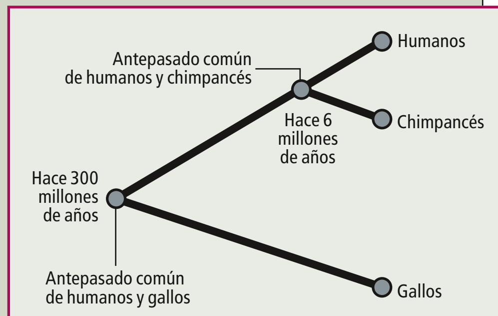
Dedicamos el siguiente año a la búsqueda de información sobre la historia evolutiva de HAR1 mediante la comparación de esta región del genoma con las de diversas especies, incluidos 12 vertebrados más que se secuenciaron durante ese período. El resultado mostraba que HAR1 había evolucionado muy lentamente antes de la aparición del hombre. Entre los gallos y los chimpancés, cuyos linajes divergieron hace alrededor de 300 millones de años, sólo dos de las 118 bases son distintas, en tanto que entre humanos y chimpancés hay 18 diferencias en un tiempo de divergencia mucho menor. El hecho de que HAR1 se mantuviera sustancialmente congelado durante cientos de millones de años indica que debe realizar algo muy importante, por lo que la súbita alteración sufrida en humanos sugiere una modificación significativa de su función en nuestro linaje.

Una pista clave sobre la función de HAR1 surgió en 2005, cuando Pierre Vanderhaeghen, de la Universidad Libre de Bruselas, nos visitó en Santa Cruz y obtuvo un vial con copias de HAR1. Usó estas secuencias de ADN para diseñar marcadores moleculares fluorescentes que emitían luz cuando HAR1 se activaba en células vivas, es decir, cuando se copiaba de ADN en ARN. Cuando un gen cualquiera se activa en la célula, se genera una copia móvil de ARN mensajero. Este ARN se usará como molde para sintetizar las proteínas que se necesiten.

El marcaje reveló que HAR1 se activaba en un tipo de neurona que desempeña una función clave en el patrón y disposición de la corteza cerebral durante el desarrollo, el repliegue más externo de la capa cerebral. Cuando el funcionamiento de estas neuronas no es el correcto, el resultado puede ser un síndrome congénito severo, a menudo letal, la lisencefalia ("cerebro liso"), en el que la corteza cerebral carece de sus pliegues característicos, reduciéndose así la superficie considerablemente. La disfunción de estas mismas neuronas

EXPLORACION DEL GENOMA

Con el fin de encontrar las secuencias de nuestro genoma que nos hacen humanos, se escribió un programa informático que busca las secuencias de ADN que más han cambiado desde que humanos y chimpancés divergieron a partir de un antepasado común. En primer lugar, de la lista quedó un fragmento de 118 letras llamado HAR1 (del inglés *human accelerated region 1*). En la mayoría de los vertebrados esta región del genoma no ha cambiado mucho a lo largo de la evolución. Por ejemplo, las secuencias del gallo y chimpancé sólo difieren en dos letras. Sin embargo, HAR1 presenta 18 letras de diferencia entre la secuencia humana y la del chimpancé, lo que sugiere que HAR1 adquirió una nueva e importante función en los humanos.





T	G	A	A	A	**C**	G	G	A	G	G	A	G	A	**C**	**G**	T	T	A	C
A	G	C	A	A	**C**	**G**	T	**G**	T	C	A	**G**	C	T	G	A	A	A	T
G	A	T	**G**	G	G	**C**	G	T	A	G	A	C	**G**	C	A	**C**	G	T	C
A	G	C	**G**	G	**C**	G	G	A	A	A	T	**G**	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	**G**	A	A	A	G	T	**G**	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	**G**	T	T	T	C	A		

Cambios en la secuencia humana respecto a la de chimpancé



T	G	A	A	A	T	G	G	A	G	G	A	G	A	A	A	T	T	A	C
A	G	C	A	A	T	T	T	A	T	C	A	A	C	T	G	A	A	A	T
T	A	T	A	G	G	T	G	T	A	G	A	C	A	C	A	T	G	T	C
A	G	C	A	G	T	**G**	G	A	A	A	**T**	A	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	T	A	A	A	G	T	A	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	A	T	T	T	C	A		

Cambios en la secuencia de chimpancé respecto a la de gallo



T	G	A	A	A	T	G	G	A	G	G	A	G	A	A	A	T	T	A	C
A	G	C	A	A	T	T	T	A	T	C	A	A	C	T	G	A	A	A	T
T	A	T	A	G	G	T	G	T	A	G	A	C	A	C	A	T	G	T	C
A	G	C	A	G	T	A	G	A	A	A	C	A	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	T	A	A	A	G	T	A	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	A	T	T	T	C	A		

guarda también relación con la aparición de la esquizofrenia a edad adulta.

Por tanto, HAR1 se activa en el momento y lugar oportuno para desempeñar un papel decisivo en la formación de una corteza cerebral sana. Otros indicios sugieren que podría participar en la producción de esperma. No se sabe aún cómo afecta exactamente este fragmento del código genético al desarrollo de la corteza. Estamos deseosos de averiguarlo, pues la explosión de sustituciones sufrida recientemente por HAR1 ha podido alterar mucho nuestro cerebro.

Más allá de su sorprendente historia evolutiva, HAR1 se caracteriza por una singularidad: no codifica ninguna proteína. Durante décadas, la biología molecular se ha centrado casi exclusivamente en el estudio de los genes que codifican los bloques estructurales básicos de las células, las proteínas. Pero gracias al Proyecto Genoma Humano, en el que se secuenció nuestro propio genoma, se sabe que los genes que codifican proteínas corresponden al 1,5 por ciento del ADN. El 98,5 por ciento restante, que a veces se denomina ADN basura, contiene secuencias reguladoras que dictan cuándo deben activarse o desactivarse otros genes, genes que se transcriben a ARN pero no se traducen en proteínas, así como otra gran cantidad de ADN cuya función estamos empezando a desentrañar.

A partir de los patrones de su secuencia, se predijo que HAR1 codifica ARN. Esta hipótesis fue confirmada experimentalmente por Sofie Salama, Haller Igel y Manuel Ares, todos de la Universidad de California en Santa Cruz, en el año 2006. Resultó que HAR1 se aloja en dos genes solapados. La secuencia compartida de HAR1 da lugar a una estructura de ARN completamente nueva, que se suma a los seis tipos de genes de ARN conocidos. Los seis grupos principales contienen más de 1000 familias distintas de genes de ARN, que difieren entre sí por la estructura y función del ARN que generan en la célula. HAR1 es también el primer ejemplo documentado de un gen seleccionado positivamente que sólo transcribe ARN.

Puede parecer sorprendente que nadie prestara antes atención a estas 118 bases del genoma humano. Pero sin disponer de las técnicas que permiten comparar genomas completos no se podía saber si HAR1 era algo más que simple basura.

Claves del lenguaje

Las comparaciones de genomas completos de otras especies han llevado a otro hallazgo crucial para la explicación de tan notables diferencias, pese a la semejanza genómica, entre humanos y chimpancés. En los últimos años se han secuenciado los genomas de miles de especies (principalmente microorganismos). Parece que la importancia de la posición de las sustituciones podría ser mucho mayor que el número total de cambios. Es decir, no se necesita cambiar mucho un genoma para generar una nueva especie. La evolución desde un ancestro de humanos y chimpancés hasta un ser humano no resulta de que se acelere el tic-tac del reloj molecular en su conjunto; el secreto radica en que se den cambios rápidos en lugares donde producen cambios sustanciales en el funcionamiento del organismo.

No cabe la menor duda de que HAR1 es uno de estos lugares. También lo es el gen *FOXP2*, cuya secuencia es otra de las de rápida

GETTY IMAGES (*hombre*); DORLING KINDERSLEY *Getty Images* (*chimpancé*); GK Y VIKKI HART *Getty Images* (*gallina*)

evolución y del que se conoce su implicación en el habla. Su función en el habla se descubrió en la Universidad de Oxford en 2001. Las personas con una mutación en este gen se muestran incapaces de realizar algunos movimientos faciales rápidos y sutiles necesarios para un habla normal, a pesar de que tienen la habilidad cognitiva de procesar el lenguaje. La secuencia típica humana muestra varias diferencias respecto a la del chimpancé: una sustitución de dos bases que altera el producto proteico y otras muchas sustituciones que han podido contribuir al cómo, cuándo y dónde se usa la proteína en el cuerpo humano.

Un hallazgo reciente ha arrojado algo de luz sobre la aparición de la versión de *FOXP2* que permite el habla en los homínidos. En 2007, en el Instituto Max Planck de Leipzig, extrajeron ADN de un fósil de neandertal y secuenciaron el gen *FOXP2*. Descubrieron que estos humanos extintos tenían la versión del gen humano actual; tal vez podían emitir sonidos articulados como nosotros. Las estimas actuales del tiempo pasado desde la separación entre humanos y neandertales sugieren que la nueva variante del gen *FOXP2* debió de surgir por lo menos hace medio millón de años.

Sin embargo, la mayoría de las diferencias entre el lenguaje humano y la comunicación vocal en otras especies no se debe a las características físicas, sino a la habilidad cognitiva, que normalmente se correlaciona con el tamaño del cerebro. Los primates suelen poseer un cerebro mayor de lo esperado en razón de su talla corporal. Pero el volumen del cerebro humano es más de tres veces mayor que el del ancestro de humanos y chimpancés. Los porqués de este crecimiento acelerado no han hecho más que empezar a formularse.

Uno de los ejemplos mejor investigados de gen relacionado con el tamaño del cerebro en humanos y otros animales es *ASPM*. Los estudios genéticos realizados a personas con microencefalia, enfermedad en la que el cerebro se reduce en un 70 por ciento, revelan la función de *ASPM* y otros tres genes más (*MCPH1, CDK5RAP2* y *CENP*) en el control del tamaño cerebral. Recientemente, en la Universidad de Chicago y en la de Michigan en Ann Arbor, se demostró que *ASPM* sufrió varios pulsos de cambio a lo largo de la evolución de los primates, un patrón indicativo de selección positiva. Al menos uno de estos pulsos ocurrió en el linaje humano tras separarse de los chimpancés y pudo, por tanto, resultar determinante en la evolución del tamaño de nuestro gran cerebro.

Otras partes del genoma pueden haber influido en la metamorfosis del cerebro humano de manera menos directa. El análisis computarizado que identificó HAR1, encontró también otras 201 regiones aceleradas, la mayoría de las cuales no codifican proteínas ni transcriben ARN. (Un estudio afín, llevado a cabo en el Instituto Wellcome Trust Sanger de Cambridge, detectó muchas de estas HAR.) Antes bien, regulan la activación o desactivación de genes próximos. Sorprendentemente, más de la mitad de los genes situados cerca de las HAR están relacionados con el desarrollo y la función del cerebro. Al igual que ocurre con el gen *FOXP2*, el producto de muchos de estos genes regula otros genes. Aunque las HAR representen una porción mínima del genoma, los cambios en tales regiones podrían haber alterado profundamente el cerebro humano por su influencia en la actividad de redes enteras de genes.

No es necesario realizar muchos cambios en un genoma para generar una nueva especie.

La autora

Katherine S. Pollard es bioestadística de la Universidad de California en San Francisco. En 2003, tras finalizar su formación posdoctoral en la Universidad de California en Berkeley, participó en la secuenciación del genoma del chimpancé con una beca de investigación en genómica comparada de la Universidad de California en Santa Cruz. Utilizó esta secuencia para identificar las regiones humanas de evolución rápida. En 2008 se le concedió la beca de investigación Sloan Research en biología molecular evolutiva y computacional. Actualmente estudia la evolución de los microorganismos que habitan en el cuerpo humano.

Más allá del cerebro

Aunque gran parte de la investigación genética se haya centrado en aclarar la evolución de nuestro complejo cerebro, se han acometido estudios sobre la adquisición de otros aspectos exclusivos del cuerpo humano. Ocupa el segundo puesto en la lista de las secuencias de evolución más acelerada HAR2, una región de regulación génica. En 2008, en el Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, se demostró que ciertos cambios de bases en la versión humana de HAR2 (también llamada HACNS1) respecto a la versión de primates no humanos permite a esta secuencia de ADN dirigir la actividad génica en la muñeca y el pulgar durante el desarrollo fetal, cosa que no hace la versión ancestral de otros primates. Este hallazgo es particularmente sugestivo, porque podría ser la base de los cambios morfológicos operados en la mano humana que permitieron la destreza necesaria para fabricar o usar herramientas complejas.

Además de los cambios de forma, nuestros antepasados adoptaron cambios en fisiología y comportamiento, lo que les ayudó a adaptarse a nuevas circunstancias y emigrar a ambientes inéditos. Por ejemplo, la conquista del fuego hace más de un millón de años y la revolución de la agricultura hace alrededor de 10.000 años hicieron más accesible la comida rica en almidón. Pero los cambios culturales no fueron suficientes para explotar esa ingesta rica en calorías. Nuestros predecesores se tuvieron que adaptar genéticamente a ella.

Cambios en el gen *AMY1*, que codifica una amilasa de la saliva, una enzima que participa en la digestión del almidón, constituye una adaptación de este tipo bien conocida. El genoma de los mamíferos contiene copias de ese gen, en un número que varía de una especie a otra, e incluso entre individuos humanos. Pero

ADN DISTINTIVO

Los esfuerzos por encontrar el ADN específicamente humano han suministrado un número de secuencias que distinguen a los humanos de los chimpancés. En la figura siguiente se muestra una lista parcial de esas secuencias y algunas de sus funciones.

SECUENCIA: HAR1

Función: Se activa en el cerebro. Puede ser necesaria para el desarrollo de la corteza cerebral, que destaca por su tamaño en los humanos. Posiblemente también está relacionada con la producción de esperma.

SECUENCIA: FOXP2

Función: Facilita la formación de sonidos vocálicos y consonánticos, lo que permite el habla humana actual.

SECUENCIA: AMY1

Función: Facilita la digestión del almidón, lo que pudo haber permitido a los primeros humanos aprovechar nuevos alimentos.

SECUENCIA: ASPM

Función: Controla el tamaño del cerebro, que se ha triplicado sobradamente a lo largo de la evolución humana.

SECUENCIA: LCT

Función: Posibilita la digestión de la lactosa (azúcar de la leche) en los adultos. Permitió utilizar la leche que proviene de los animales domésticos como alimento básico en la dieta.

SECUENCIA: HAR2

Función: Dirige la actividad génica de la muñeca y el pulgar durante el desarrollo. Esta actividad podría haber proporcionado a la mano la destreza para hacer y usar herramientas complejas.

MELISSA THOMAS

en general, comparando con otros primates, los humanos tenemos un número especialmente elevado de copias de *AMY1*. En 2007, en la Universidad estatal de Arizona, se demostró que los individuos con mayor número de copias de *AMY1* presentaban más amilasas en la saliva, lo que les permitía digerir mayor cantidad de almidón. Parece, pues, que tanto el número de copias del gen como los cambios específicos de la secuencia de ADN se hallan implicados en la evolución de *AMY1*.

Otro ejemplo conocido de adaptación alimentaria es el gen de la lactasa (*LCT*), una enzima que permite a los mamíferos digerir la lactosa. En muchas especies sólo pueden procesar la lactosa los bebés. Pero hace alrededor de 9000 años, tiempo muy reciente en términos evolutivos, se produjeron cambios en el genoma humano que crearon nuevas versiones de *LCT* y permitieron así la digestión de la lactosa en los adultos. Las diferentes versiones de *LCT* evolucionaron de manera independiente en poblaciones europeas y africanas; los portadores de la versión modificada podían digerir la leche de los animales domésticos. Hoy día, los descendientes de estos antiguos pastores tienen mucha mayor probabilidad de ser tolerantes a la lactosa de la dieta que los adultos de otras partes del mundo, como Asia e Iberoamérica, donde una gran mayoría presentan intolerancia a la lactosa porque poseen la versión ancestral del gen.

El gen *LCT* no es el único que evoluciona hoy en los humanos. Gracias al proyecto genoma del chimpancé se identificaron otros 15 genes que han cambiando desde una versión que era perfectamente normal en nuestros ancestros antropoides, y que funciona correctamente en otros mamíferos, pero que en los humanos modernos se relaciona con ciertas enfermedades, como el Alzheimer o el cáncer. Varias de estas enfermedades sólo las padecen los humanos o se dan en humanos en una tasa superior que en otros primates. Actualmente, se está investigando la función de estos genes para intentar esclarecer por qué la versión ancestral llegó a ser perjudicial. La investigación en marcha podría ayudar a los profesionales de la salud a identificar pacientes con una mayor probabilidad de contraer una de estas enfermedades y a evitar que la padezcan. También debería posibilitar la aparición de nuevos tratamientos.

Con el bien llegó el mal

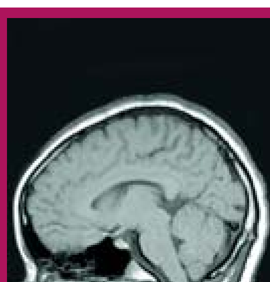
Como en el resto de las especies, luchar contra las enfermedades para transmitir nuestros genes a las generaciones futuras ha sido una constante en la evolución de la especie humana. Es en el sistema inmunitario donde esta

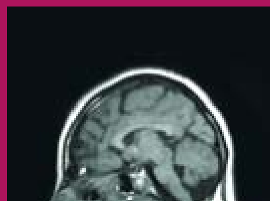
batalla se hace más evidente. Cuando se examina el genoma humano en busca de huellas de selección positiva, los candidatos principales acostumbran a participar en la inmunidad. No es de extrañar que la evolución realice tantos pequeños ajustes en esos genes. En ausencia de antibióticos y vacunas, el obstáculo más frecuente para que los individuos transmitieran sus genes eran las infecciones, que ponían en peligro la vida antes del final de la edad reproductiva. Una aceleración de la evolución del sistema inmunitario causa una constante adaptación de los patógenos a nuestras defensas: se crea una carrera armamentística evolutiva entre microorganismos y huéspedes.

Los registros de ese antagonismo se graban en el ADN. Acontece así en los retrovirus, como el VIH, que sobreviven y se propagan insertando su material genético en nuestro genoma. Muchos de los de genomas retrovíricos cortos insertos en el ADN humano pertenecen a virus que causaron enfermedades millones de años atrás, aunque hoy día están inactivos. A lo largo del tiempo se han acumulado mutaciones al azar, como en cualquier otra secuencia, en las secuencias retrovíricas, de manera que las copias de estos genomas son similares, pero no idénticas.

Examinando la cuantía de la divergencia entre tales copias, podemos aplicar técnicas del reloj molecular y fechar el origen de la infección retrovírica. Las cicatrices de estas antiguas infecciones se dejan ver también en los genes del sistema inmunitario del huésped, que constantemente se debe adaptar en su lucha incesante contra la evolución del retrovirus.

PtERV1 es uno de esos virus vestigiales. En los humanos actuales, la proteína TRIM5α evita que se repliquen PtERV1 u otros retrovirus relacionados. Indicios genéticos sugieren que hubo una epidemia de PtERV1 que afectó a los chimpancés, gorilas y humanos que habitaban en Africa hace unos cuatro millones de años. Para comprender las repuestas a PtERV1 de diferentes primates, en 2007, en el Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas de Seattle, se usaron las múltiples copias mutadas al azar de PtERV1 del genoma de chimpancé; el objeto era reconstruir la secuencia original de PtERv1 y recrear el antiguo retrovirus. Realizaron experimentos para comprobar cuál de las dos versiones del gen *TRIM5*α, la de los humanos o la de los grandes simios, podría restringir mejor la actividad del virus resucitado. Los resultados indican que un solo cambio en la secuencia *TRIM5*α humana permitió, probablemente, combatir con mayor eficiencia una infección de PtEVR1 que lo que podían combatirla







2. FORMAS DEL CEREBRO: Los cambios en algunas secuencias genómicas pueden producir efectos espectaculares en el cerebro. Por ejemplo, la mutación del gen *ASPM* causa una reducción considerable del tamaño del cerebro (*en medio*), comparado con un cerebro normal (*arriba*), lo que da a entender que este gen desempeñó una función clave en la evolución hacia el aumento del tamaño cerebral de los humanos. Por otro lado, la disfunción de las neuronas en las que HAR1 se halla activa durante el desarrollo puede dar lugar a un trastorno severo en el que el plegamiento de la corteza cerebral no se produce correctamente (*abajo*); parece indicar que HAR1 resulta determinante para la formación de una corteza cerebral sana.

CORTESIA DE GANESHWARAN H. MOCHIDA, C. GEOFFREY WOODS Y CHRISTOPHER A. WALSH (*arriba y centro*); CORTESIA DE GAVIN UDSTUEN UNIVERSIDAD DE CINCINNATI (*abajo*)

nuestros parientes primates. (En humanos, la respuesta a retrovirus emparentados puede haberse producido por cambios adicionales en *TRIM5*α.) Otros primates poseen su propio conjunto de cambios en *TRIM5*α, reflejando, a buen seguro, batallas ganadas por sus predecesores contra los retrovirus.

Ahora bien, vencer a un tipo de retrovirus no garantiza poder derrotar a otros. Aunque los cambios en la secuencia *TRIM5*α nos hayan ayudado a sobrevivir a PtERV1, esos mismos cambios hacen que sea mucho más difícil escapar del VIH. Tales descubrimientos ayudan a comprender por qué sólo los humanos infectados con el VIH, y no el resto de los primates, desarrollan el sida. La evolución puede dar un paso adelante y dos atrás. A veces pasa lo mismo en la investigación científica. Se han identificado muchos candidatos interesantes que podrían explicar las bases genéticas de los rasgos que nos caracterizan como humanos. Sin embargo, en la mayoría de los casos sólo conocemos lo más básico de la función de estas secuencias concretas del genoma. En las regiones que no codifican proteínas, como HAR1 y HAR2, las lagunas de nuestro conocimiento son extensas.

Estas secuencias de rápida evolución presentes sólo en la especie humana indican un camino a seguir. La explicación de qué nos hizo humanos probablemente no se centre en los cambios de los ladrillos proteínicos de que estamos hechos, sino en cómo la evolución ensambla de manera diferente los ladrillos cambiando la activación y desactivación de los genes en función del tiempo y lugar en que se encuentren. Se están llevando a cabo estudios experimentales y computacionales en miles de laboratorios de todo el mundo con la esperanza de dilucidar qué está sucediendo en el 98,5 por ciento de nuestro genoma que no codifica proteínas y que cada día parece ser menos basura.

Bibliografía complementaria

MAPPING HUMAN HISTORY: DISCOVERING THE PAST THROUGH OUR GENES. Steven Olson. Houghton Mifflin, 2002.

THE ANCESTOR'S TALE: A PILGRIMAGE TO THE DAWN OF EVOLUTION. Richard Dawkins. Houghton Mifflin, 2004.

INITIAL SEQUENCE OF THE CHIMPANZEE GENOME AND COMPARISON WITH THE HUMAN GENOME. The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium en *Nature*, vol. 437, págs. 69-87, 1 de septiembre, 2005.

PROPULSION Y CONDUCCION DE NANORROBOTS

Pequeños vehículos submarinos emplean motores catalíticos para absorber combustible de su entorno y superar las leyes físicas del mundo microscópico

Thomas E. Mallouk y Ayusman Sen

CONCEPTOS BASICOS

- La nanotecnia promete inventos futuristas como robots microscópicos que fabrican otras máquinas o se introducen en el cuerpo humano para transportar medicamentos y realizar operaciones de microcirugía.
- Estas máquinas se hallan sometidas a leyes físicas particulares. A escalas reducidas, los fluidos parecen tan viscosos como la melaza y el movimiento browniano hace que todo sufra continuas sacudidas.
- Basándose en los motores biológicos que operan en las células, los químicos están aprendiendo a propulsar máquinas micro y nanométricas mediante reacciones catalíticas.

Imaginemos por un instante que pudiéramos fabricar coches, aviones y submarinos del tamaño de una bacteria o de unas pocas moléculas. Podrían diseñarse robots cirujanos microscópicos que, introducidos en el cuerpo humano, localizarían y eliminarían el agente físico de las enfermedades (la placa interior de las arterias o los depósitos proteínicos que pueden provocar la enfermedad de Alzheimer). Las nanomáquinas, robots con características y componentes de escala nanométrica, penetrarían en las vigas de acero o en las alas de los aviones para reparar grietas invisibles antes de su propagación, evitando accidentes y catástrofes.

En los últimos años, los químicos han diseñado estructuras moleculares sorprendentes, que podrían convertirse en piezas de máquinas diminutas. James Tour y otros investigadores de la Universidad Rice han sintetizado un coche de tamaño molecular que incorpora, a modo de ruedas, cuatro buckybolas (moléculas de carbono en forma de balón de fútbol), que son 5000 veces menores que las células humanas.

Pero si mira bajo el capó del nanocoche no encontrará ningún motor. Los nanocoches de Tour se mueven sólo en la medida en que son impulsados por colisiones aleatorias con las moléculas circundantes (el famoso movimiento browniano). Este constituye el mayor problema actual de las máquinas moleculares: sabemos cómo construirlas, pero no cómo alimentarlas.



Cuando se trata de las dimensiones de las células humanas o inferiores, esa tarea implica ciertos desafíos únicos. A esa escala, el aire y el agua resultan tan densos como la melaza y el movimiento browniano dificulta el mantenimiento de la trayectoria de las moléculas en una dirección concreta. En estas condiciones, las versiones nanométricas de los motores típicos de los vehículos o de los secadores de pelo no podrían ni siquiera arrancar, suponiendo que supiéramos fabricarlos a dicha escala.

Sin embargo, la naturaleza proporciona numerosos ejemplos de nanomotores. Sólo hay que echar un vistazo a las células: usan nanomotores para cambiar de forma, separar sus cromosomas cuando se dividen, sintetizar proteínas, absorber nutrientes, almacenar sustancias químicas a su alrededor y muchas otras tareas. Todos esos motores celulares, así como los que contraen los músculos y permiten a las bacterias girar el flagelo para desplazarse como si se tratara de un sacacorchos, se basan en el mismo principio: convierten en energía mecánica la energía química, almacenada en forma de trifosfato de adenosina (ATP, por sus siglas

KENN BROWN *Mondolithic Studios (robots microscópicos)*

en inglés). Usan catalizadores, compuestos que facilitan las reacciones químicas, tales como la descomposición del ATP. Mediante la aplicación de principios similares, se está avanzando en la construcción de nanomotores artificiales.

En 2004, cuando formábamos parte de un equipo de la Universidad estatal de Pennsylvania, creamos unos nanomotores sencillos que, con la ayuda de catalizadores, transformaban en movimiento la energía almacenada en moléculas de combustible. Nuestra fuente de inspiración fue un motor de mayor tamaño creado en 2002 por Rustem Ismagilov y George Whitesides, de la Universidad de Harvard, cuyo equipo diseñó "barcos" de la talla de centímetros y con tiras de platino catalítico en la popa. Los barcos se desplazaban de forma espontánea en la superficie de un depósito de agua y peróxido de hidrógeno (H_2O_2, agua oxigenada): el platino favorecía la descomposición del H_2O_2 en oxígeno y agua, y las burbujas de oxígeno formadas impulsaban al barco hacia adelante, del mismo modo que los gases de escape de la parte trasera de un cohete le proporcionan el impulso.

Miniaturización extrema

La versión en miniatura que obtuvimos del motor de Harvard era una varilla de oro y platino de una longitud equivalente a la de una célula bacteriana (dos micras) y la mitad de ancha (350 nanómetros). Nuestras varillas no flotaban en la superficie; estaban sumergidas en la solución. De igual modo que los motores moleculares de ATP que operan en el interior de las células, estos diminutos cilindros catalíticos se hallaban sumergidos en su propio combustible. Se desplazaban con autonomía, a velocidades de decenas de micras por segundo. Vistos al microscopio, guardaban un estrecho parecido con bacterias en movimiento.

Lamentablemente —como ocurre tan a menudo en el terreno científico—, la hipótesis en la que se basaba nuestro experimento era errónea. Pensábamos que las nanovarillas lanzarían, desde la parte posterior, diminutas burbujas, que desplazarían las varillas por la fuerza de empuje. Pero el comportamiento fue otro. Resultaba patente que, para trabajar a escalas tan exiguas, debíamos cambiar nuestra concepción del movimiento.

En la macroescala, la idea del movimiento a reacción tiene sentido. Cuando nadamos o cuando remamos, los brazos, piernas o remos empujan el agua hacia atrás y la fuerza de reacción propulsa el cuerpo o la barca hacia adelante. De esa manera, el nadador o la nave se deslizan hacia adelante incluso cuando se cesa de nadar o remar. La distancia hasta la que continúa el desplazamiento la determi-

1. LOS ROBOTS MICROSCOPICOS del futuro quizás hayan encontrado por fin una fuente de alimentación. Motores que convierten en movimiento la energía química podrían algún día alimentar las nanomáquinas, de modo que pudieran nadar pese al movimiento aleatorio (browniano) y a la viscosidad de los fluidos, los factores que gobiernan el movimiento a escala microscópica.



Los autores

Thomas E. Mallouk ocupa la cátedra DuPont de física y química de materiales en la Universidad estatal de Pennsylvania. Sus principales áreas de investigación son la síntesis y las propiedades de los materiales inorgánicos a escala nanométrica. **Ayusman Sen**, nacido en Calcuta, es profesor de química en la Universidad estatal de Pennsylvania. Centra su trabajo en la catálisis y los materiales orgánicos e inorgánicos.

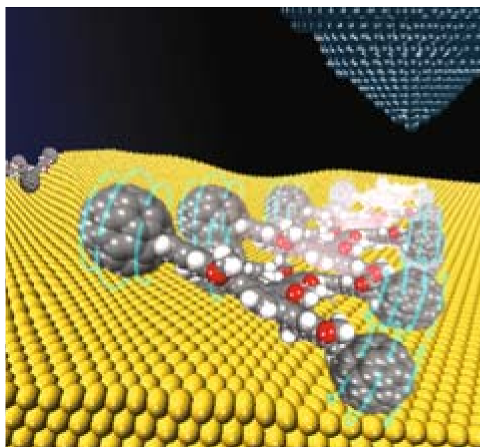


nan la viscosidad (resistencia al avance) y la inercia (resistencia de un cuerpo a cambiar su velocidad). La resistencia al avance es proporcional a la anchura del objeto; la inercia es proporcional a la masa del mismo, es decir, al *cubo* de la anchura. Cuanto menor es un objeto, más se reduce la inercia con respecto a la resistencia al avance; para cuerpos diminutos, la inercia se torna despreciable, quedando sólo la viscosidad.

A escala micrométrica, los deslizamientos debidos a la inercia duran alrededor de un microsegundo y la distancia recorrida es inferior a una centésima de nanómetro. Para un cuerpo micrométrico sumergido en agua, el agua se comporta de modo parecido a la miel. Los nanomotores no conservan memoria alguna de lo que les ha ayudado a desplazarse (carecen de inercia); no sirven, pues, los esquemas de propulsión basados en la inercia, como el movimiento de empuje creado por las burbujas.

El funcionamiento de nuestras nanovarillas se basa en la aplicación de una fuerza continua para vencer la resistencia al avance, sin necesidad de desplazamiento inercial. En el extremo de platino, cada molécula de H_2O_2 se descompone en una molécula de oxígeno, dos electrones y dos protones. En el extremo de oro, los electrones y los protones se combinan con cada molécula de H_2O_2 para producir dos moléculas de agua. Se genera así un exceso de protones en un extremo de la varilla y un déficit de protones en el otro extremo. Con semejante disposición, los protones cursan desde el platino hacia al oro, a través de la superficie de la varilla.

Al igual que todos los iones positivos en medio acuoso, los protones atraen la región dotada de carga negativa de las moléculas de agua; de ese modo desplazan dichas moléculas conforme avanzan, impulsando la varilla en el sentido opuesto, tal como establece la tercera ley de Newton: por cada fuerza de acción existe una fuerza de reacción de sentido contrario.



2. EL NANOCOCHE es uno de los diversos tipos de máquinas moleculares con piezas móviles. Dispone de ejes de compuestos de carbono y cuatro ruedas formadas por buckybolas (moléculas de carbono en forma de balón de fútbol). Sin embargo y por el momento, los nanocoches carecen de motor, por lo que se mueven sólo hacia adelante y hacia atrás de forma aleatoria cuando la superficie se calienta (*flechas*).

T. SASAKI *Universidad Rice (nanocoche)*

Cuando desentrañamos el origen de ese movimiento —tarea en la que contamos con la ayuda de alumnos y de Vincent H. Crespi, Darrell Velegol y Jeffrey Catchmark, compañeros nuestros de la Universidad estatal de Pennsylvania—, acometimos el diseño de nuevos nanomotores catalíticos. El equipo de Adam Heller, de la Universidad de Texas en Austin, y el de Joseph Wang, de la Universidad estatal de Arizona, demostraron que la mezcla de varios combustibles (glucosa y oxígeno, o H_2O_2 e hidracina) permitía alcanzar mayores velocidades que los combustibles de un solo compuesto.

Mientras que las nanovarillas de metal libremente suspendidas se mueven por toda la solución, una estructura de metal inmovilizada y sumergida en H_2O_2 provocará flujos de fluido alrededor de la superficie de la estructura. Podrían aprovecharse dichos flujos en la interfaz entre la estructura y el fluido para mover un tercer objeto sumergido en el fluido. Hemos demostrado este efecto de bombeo de fluido con una superficie de oro recubierta parcialmente con plata.

Se necesita un timón

Una de las carencias de nuestras primeras nanovarillas sumergidas en fluido consistía en que se movían en dirección aleatoria y cambiaban sin cesar y al azar de rumbo, debido al movimiento browniano. Por supuesto, para aplicaciones reales, las nanomáquinas necesitarán un mecanismo que les guíe hacia su objetivo.

Nuestro primer intento para solucionar el problema del rumbo se basó en campos magnéticos. Añadimos a las varillas discos de níquel que reaccionaban en presencia de campos magnéticos, como si fueran diminutas brújulas con el eje norte-sur perpendicular a la longitud del cilindro. Un imán de nevera dispuesto a escasos milímetros genera en uno de esos cilindros el par de fuerzas suficiente para evitar la tendencia del movimiento browniano de girar aleatoriamente. La única fuerza restante es longitudinal y la proporciona la reacción catalítica. Las nanovarillas se mueven en línea recta y se pueden orientar girando el imán. Se obtiene un movimiento similar al de las bacterias que se alinean con el débil campo magnético terrestre. Los nanomotores de ese tipo navegan en un laberinto magnético micrométrico, siguiendo las líneas de campo mediante vaivenes.

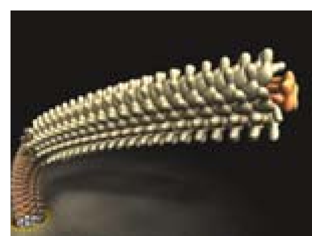
El año pasado, Crespi y uno de nosotros (Sen) demostramos que los motores controlados magnéticamente eran capaces de desplazar

"contenedores de carga" (esferas de plástico de unas diez veces el tamaño del motor) a través del fluido. Es fácil imaginar un sinfín de usos y aplicaciones para estos vehículos de carga: podrían llevar medicamentos a células concretas del cuerpo o transportar moléculas a lo largo de una cadena de montaje nanométrica, donde la carga podría unirse químicamente a otras moléculas.

La capacidad de dirigir externamente el rumbo de los nanorrobots sería útil para numerosas aplicaciones; para otras, resultaría esencial que los nanorrobots se desplazaran de forma autónoma. Velegol y Sen han descubierto en fecha reciente algo posiblemente revolucionario: nuestras nanovarillas catalíticas pueden seguir "rastros de migas de pan", del mismo modo que las bacterias. Las bacterias se mueven a través de una serie de pasos en línea recta alternados con giros aleatorios. Cuando un desplazamiento en línea recta coincide con un gradiente químico (por ejemplo, el olor creciente de comida cada vez más cercana), las bacterias alargan la longitud de ese desplazamiento recto. Dado que los desplazamientos favorables duran más tiempo que los otros, el resultado global es que las bacterias acaban alcanzando el objetivo, pese a no disponer de mecanismo directo para escoger el rumbo. Esta estrategia se denomina quimiotaxis.

Nuestros nanomotores se mueven con mayor celeridad en los puntos donde la concentración de combustible es mayor, por lo que sus desplazamientos en línea recta son más largos en dichos puntos. La consecuencia es que tienden a dirigirse hacia las fuentes de combustible (por ejemplo, una partícula de gel empapada de peróxido de hidrógeno).

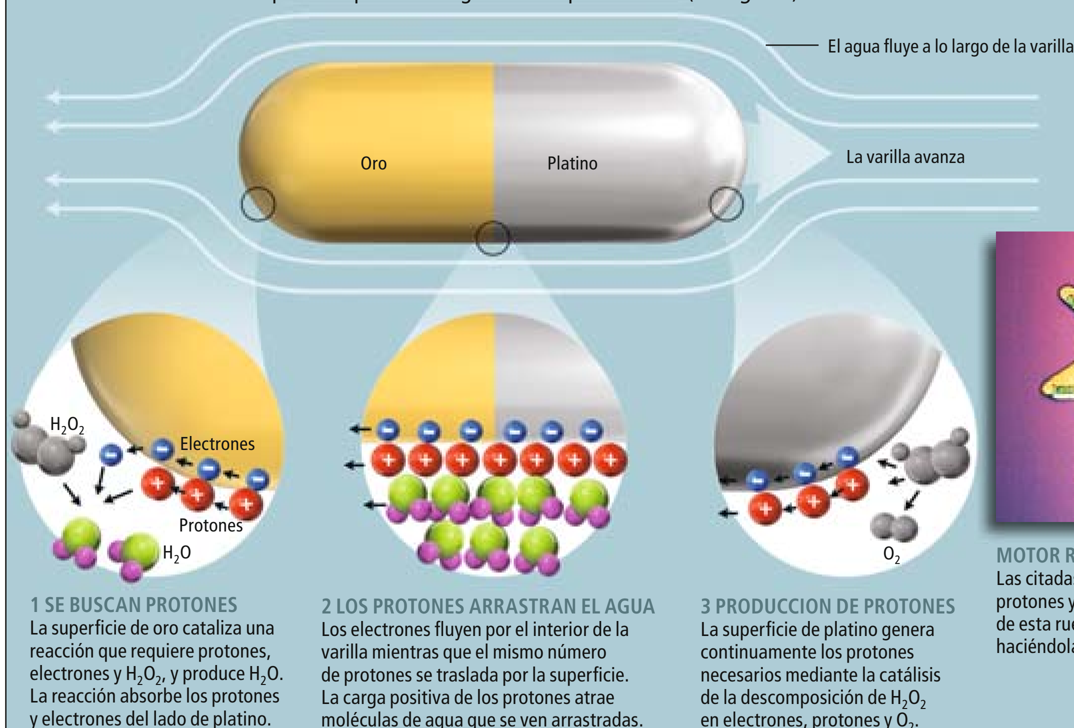
Más tarde, creamos partículas motoras que se dirigían hacia fuentes de luz, una habilidad denominada fototaxis. Esas partículas emplean la luz para descomponer moléculas y crear iones positivos y negativos. Los dos tipos de iones se desplazan a velocidades diferentes, con lo que crean un campo eléctrico que provoca el movimiento de las partículas. En función de la naturaleza de los iones generados y de la carga de las partículas, éstas se acercan o se alejan de las regiones más iluminadas. Un desarrollo interesante de esta técnica es un sistema controlado por luz, en el que unas partículas operan a modo de "depredador" y



3. ALGUNAS BACTERIAS, como *Escherichia coli*, utilizan motores moleculares para hacer girar sus flagelos. La imagen superior muestra un modelo informático de la estructura molecular de un flagelo. El giro empuja hacia adelante la célula, de forma parecida al retroceso de un tornillo al aflojarlo. En el medio líquido de las bacterias, la viscosidad predomina sobre la inercia: si el flagelo para de girar, las bacterias se detienen casi de inmediato.

ESTRUCTURA DE UN MOTOR CATALITICO

Los autores han creado dos varillas de platino y oro de dos micras de longitud. Cuando se sumergen en una solución de agua y peróxido de hidrógeno (H_2O_2, agua oxigenada), se autopropulsan mediante el empuje del fluido a lo largo de su superficie. El flujo del fluido lo alimentan dos reacciones químicas que tienen lugar en las superficies de oro y de platino. El flujo continuo posibilita a las varillas vencer la viscosidad del medio. Los motores catalíticos podrían alimentar a robots del tamaño de una bacteria para navegar en el interior del cuerpo humano y accionar mecanismos microscópicos tales como engranajes (*micrografía*).



1 SE BUSCAN PROTONES
La superficie de oro cataliza una reacción que requiere protones, electrones y H_2O_2, y produce H_2O. La reacción absorbe los protones y electrones del lado de platino.

2 LOS PROTONES ARRASTRAN EL AGUA
Los electrones fluyen por el interior de la varilla mientras que el mismo número de protones se traslada por la superficie. La carga positiva de los protones atrae moléculas de agua que se ven arrastradas.

3 PRODUCCION DE PROTONES
La superficie de platino genera continuamente los protones necesarios mediante la catálisis de la descomposición de H_2O_2 en electrones, protones y O_2.



MOTOR ROTATIVO
Las citadas reacciones químicas desplazan protones y agua alrededor de los dientes de esta rueda de 100 micras de anchura, haciéndola girar.

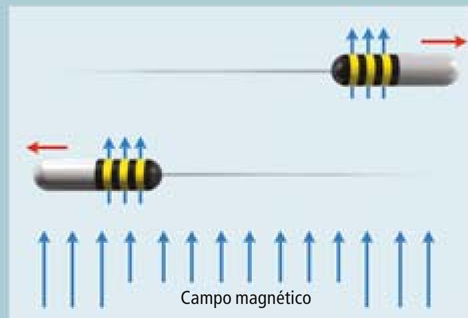
KEIICHI NAMBA *Universidad de Osaka* Y ERATO PROTONIC NANOMACHINE PROJECT, JST (*flagelo*); FUENTE: "DIRECTED ROTATIONAL MOTION OF MICROSCALE OBJECTS USING INTERFACIAL TENSION GRADIENTS CONTINUALLY GENERATED VIA CATALYTIC REACTIONS," POR JEFFREY CATCHMARK, SHYAMALA SUBRAMANIAN Y AYUSMAN SEN, EN *Small*, VOL. 1, N.º 1; 2005 (*nanomotor*)

NAVEGACION CON BRUJULA

Hallar una fuente de propulsión adecuada es sólo parte del problema de la movilidad de los nanorrobots. Otra tarea pendiente es poder mantener constante la dirección de los robots y guiarlos hacia su destino. Unas nanovarillas especiales incorporan brújulas (con el eje norte-sur transversal a la varilla) que operan a modo de "timón" magnético.



VARILLAS INCONTROLADAS
Cuando el campo magnético no está activo, el movimiento es aleatorio.



VARILLAS CONTROLADAS
Al activar el campo magnético, las varillas se orientan de forma perpendicular al campo. Las varillas se mueven sólo en una dirección, que puede modificarse a voluntad reorientando el campo magnético.

otras a modo de "presa". En nuestro caso, un tipo de partículas genera iones que provocan que un segundo tipo se dirija hacia el primero. El movimiento combinado de ambos tipos de partícula presenta un parecido asombroso al de unos leucocitos persiguiendo a una bacteria.

El uso de la quimiotaxis y la fototaxis se halla todavía en fase de prueba, pero podrían conducir al diseño de nanorrobots autónomos e "inteligentes", que se desplazarían hacia su objetivo de manera autónoma, quizás alimentándose de glucosa u otros combustibles abundantes en el interior de los organismos o en el medio. Este trabajo puede también conducir al desarrollo de robots que se comuniquen químicamente entre sí y realicen tareas colectivas, como moverse en grupo y disponerse de forma ordenada.

Miniaturización

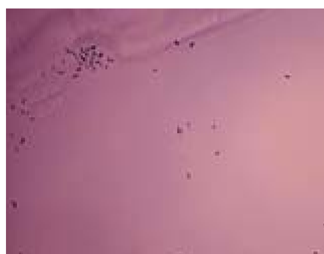
A pesar de que las partículas que muestran este comportamiento colectivo son "inanimadas", su movimiento está gobernado por fenómenos físicos similares a los que operan en las células. Por tanto, los nanomotores no sólo se inspiran en la biología, sino que también arrojan luz sobre las bases del movimiento de los sistemas vivos. Una de las reglas sencillas que hemos aprendido mientras estudiábamos los motores catalíticos es que la velocidad de crucero típica de un nanomotor debería ser proporcional a su tamaño lineal (longitud o anchura). Esta ley de escala se debe a que la resistencia al desplazamiento es proporcional al tamaño lineal, mientras que la velocidad de la reacción catalítica es proporcional a la superficie, que aumenta con el *cuadrado* del tamaño.

James H. Marden, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ha descubierto una ley de escala más general, que establece una relación entre la masa de un motor y la fuerza máxima que puede producir. El resultado principal de esta ley —válida para todos los motores, desde los moleculares hasta los de aviación— es que cuanto más pequeño es un motor, más lento. Aplicada al dimensionamiento de los nanomotores catalíticos, llega un punto (alrededor de los 50 o 100 nanómetros) en que el movimiento browniano amortigua toda la propulsión de las reacciones catalíticas. Como resultado, las bacterias micrométricas son los nadadores libres más pequeños de todo el reino biológico. A escalas inferiores, el movimiento browniano hace imposible mantener una dirección fija en el interior de un fluido. De hecho, todos los motores moleculares de la naturaleza (incluidas las proteínas de los músculos y las enzimas que producen el ATP) están limitados a desplazarse a lo largo de una vía existente o a unirse a una membrana. Los futuros robots moleculares correrán la misma suerte.

Con la ayuda de trinquetes

Para los motores moleculares, la catálisis en superficie ensayada con éxito en nuestras nanovarillas puede que tampoco sea suficiente para contrarrestar el movimiento browniano, se halle o no limitado a una dirección el movimiento del robot. Afortunadamente, la naturaleza ha encontrado el medio no sólo

4. LAS VARILLAS CATALITICAS tienden a moverse mediante desplazamientos aleatorios cuando se hallan en presencia de combustible, pero los desplazamientos duran más tiempo allí donde la concentración de combustible es mayor. El resultado es que las nanovarillas siguen los gradientes químicos de combustible del mismo modo que las bacterias rastrean la comida mediante el olor. En las imágenes, las varillas se agrupan alrededor de un gel rico en combustible (*en la parte superior izquierda de cada fotografía*).









FUENTE DEL RECUADRO: "CHEMICAL LOCOMOTION," POR WALTER F. PAXTON, SHAKUNTALA SUNDARARAJAN, THOMAS E. MALLOUK Y AYUSMAN SEN, EN *ANGEWANDTE CHEMIE INTERNATIONAL EDITION*, VOL. 45, N.º 33; 2006; DON FOLEY (*ilustración*); "CHEMOTAXIS OF NON-BIOLOGICAL COLLOIDAL RODS," POR YIYING HONG, NICOLE M. K. BLACKMAN, NATHANIEL D. KOPP, AYUSMAN SEN Y DARRELL VELEGOL, EN *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOL. 99, N.º 17; OCTUBRE 2007 (*varillas catalíticas*)

MICRONADADORES COLOIDALES

Los avances recientes en las técnicas de microfabricación permiten la obtención de dispositivos progresivamente más pequeños, que pueden ser alimentados por fuentes de energía externas o que se nutren de reacciones químicas, como los nanomotores químicos.

Si queremos que tales microdispositivos se desenvuelvan en un fluido y deseamos mantener un control preciso de su posición y velocidad (lo que nos permitiría utilizarlos a modo de pequeños submarinos que navegaran en microcanales como arterias o poros), debemos cumplir una condición de suma importancia que se plantea sólo en este "micromundo": el movimiento de los micronadadores no puede ser recíproco.



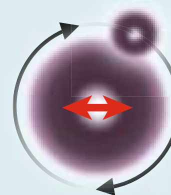
Imagen de microscopio de un doblete coloidal.

Un movimiento recíproco es simétrico respecto del tiempo. (Si lo grabamos en vídeo y lo proyectamos luego marcha atrás, nos parecerá idéntico.) Son recíprocos los movimientos que se componen de un desplazamiento periódico hacia atrás y hacia adelante (como el de la vieira, que sólo puede abrir o cerrar su concha para lanzar agua). Debido a esa limitación, las bacterias y otros microorganismos han desarrollado mecanismos complejos (como los flagelos) para adaptarse a la física de fluidos en la microescala.

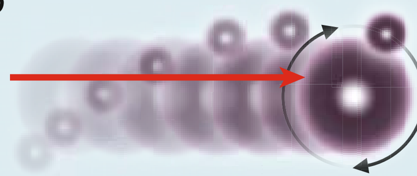
Diversos grupos de científicos están desarrollando, a partir de ejemplos de la naturaleza, nuevas estrategias para lograr el movimiento a escala microscópica en un fluido viscoso. Rémi Dreyfus y sus colaboradores, del Laboratorio de coloides y materiales blandos (ESPCI) de París, han fabricado un nadador artificial microscópico, que guarda semejanza con un espermatozoide: una cadena de partículas coloidales magnéticas unidas con puentes de ADN y rematada con un glóbulo rojo. Las partículas coloidales magnéticas constan de microbolas de poliestireno dopadas con gránulos nanométricos de óxido de hierro; al ser magnéticos estos nanogránulos, la partícula coloidal puede ser manipulada mediante un campo magnético. Cuando oscila el campo magnético externo, oscila también la "cola" del micronadador (parte magnética), pero no la cabeza (parte sin imantar); esa oscilación genera el flujo que permite la natación.

En nuestro laboratorio hemos desarrollado otra estrategia de micronavegación, no inspirada en la naturaleza. Se funda en la ruptura de la simetría espacial del fluido. Nuestro nadador coloidal consta de un doblete de micropartículas magnéticas unidas mediante un puente de ADN. Cuando se expone a un campo magnético externo, el doblete rota a la manera de un giroscopio. La rotación no bastaría, por sí sola, para desplazar el objeto, ya que corresponde a un movimiento simétrico (*a*, el desplazamiento que resulta de la rotación es invariante respecto del sentido de ésta) y, por tanto, recíproco. Sin embargo, en las proximidades de un plano sólido (*b*) el movimiento ya no es recíproco, puesto que se rompe la simetría espacial del sistema; ello permite que el fluido sea "exprimido", transformando la rotación en propulsión.

a



b



Para entenderlo mejor, establezcamos una analogía con la rueda de bicicleta: cuando se levanta sólo rota, pero si la dejamos en el suelo, mueve la bicicleta. Nuestro doblete (mucho más pequeño que un tornillo de esa bicicleta) tiene la capacidad de propulsarse en un fluido viscoso cuando se halla cerca de una superficie, pero sin punto de contacto mecánico.

Pietro Tierno y Francesc Sagués
Departamento de Química Física, Universidad de Barcelona

para no tener que luchar contra el movimiento browniano sino para aprovecharlo. Muchos motores biológicos se basan en el principio de los trinquetes brownianos: éstos emplean la energía de la catálisis química no para generar un movimiento en una dirección determinada, sino para permitir el empuje del movimiento browniano sólo cuando se da en la dirección deseada y anularlo cuando empuja en la dirección opuesta [*véase* "Motores moleculares", por R. Dean Astumian; Investigación y Ciencia, septiembre de 2001]. En los últimos años, los investigadores han comenzado a ensayar los primeros sistemas artificiales de trinquetes brownianos.

Orlin Velev y sus colaboradores, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, han descubierto otro posible método de propulsión y dirección, que permite impeler objetos en fluidos sin necesidad de combustible. Dichos objetos contienen un diodo en el interior, un dispositivo que permite a la corriente eléctrica atravesarlo en un sentido pero no en el opuesto. Los investigadores aplican un campo eléctrico alterno. En las proximidades del objeto, el diodo transforma el campo alterno en uno estático, que, al apuntar siempre en la misma dirección, genera una fuerza que produce el movimiento.

Dado que la alimentación es externa, los motores basados en diodos no siguen la misma ley del tamaño que los motores catalíticos. Velev ha demostrado que, en la escala de centímetros o decímetros, la velocidad de un motor

PIETRO TIERNO Y FRANCESC SAGUES

MOVIMIENTO PERPETUO (CON PEAJE)

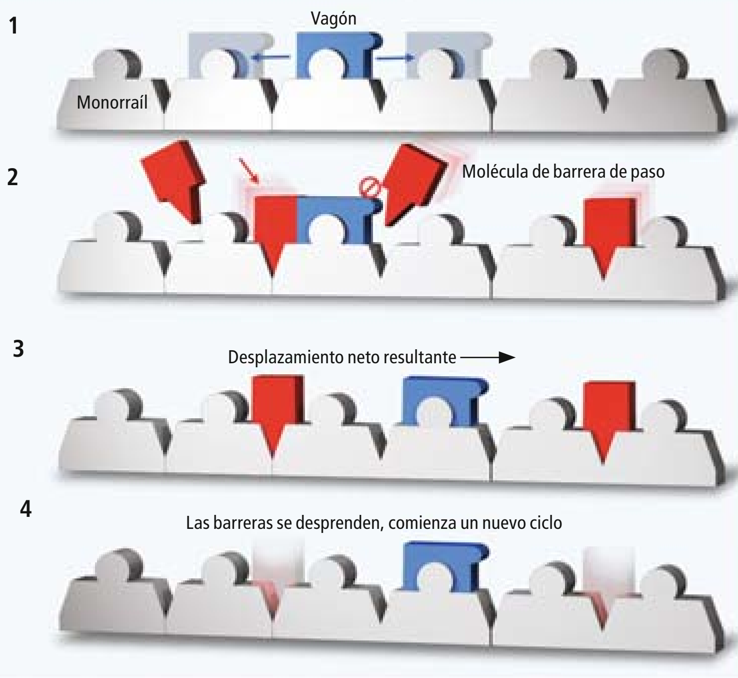
Las moléculas nunca paran quietas. En los líquidos, este movimiento molecular aleatorio se denomina movimiento browniano. Los químicos están creando los primeros trinquetes brownianos artificiales: máquinas a escala molecular que no luchan contra el movimiento browniano, sino que lo aprovechan. David Leigh y su equipo, de la Universidad de Edimburgo, están desarrollando un sistema de monorraíl que convierte el movimiento aleatorio en controlado (*abajo*). El invento podría parecer una máquina de movimiento perpetuo que viola las leyes de la termodinámica o de la regla de "no hay atajo sin trabajo". La violación es sólo aparente, pues todos los métodos de control del movimiento browniano requieren energía para seleccionar el movimiento favorable. Y éste no es una excepción: si no se suministra la energía necesaria, el movimiento cesa.

1 EL VEHICULO SE MUEVE AL AZAR
La molécula "vehículo" se desplaza en pasos discretos, como un vagón a lo largo de un "monorraíl" sumergido en líquido. Este vehículo sin motor está sujeto al movimiento browniano de los líquidos, por lo que avanza y retrocede cada vez que lo golpea una molécula de líquido excepcionalmente rápida.

2 ACCION DE LAS BARRERAS DE PASO
Las moléculas del líquido también se unen al raíl y actúan como barreras de paso. Sin embargo, el vagón es asimétrico, para evitar que esas moléculas barrera se unan justo delante de él.

3 CONTROL DE LA ALEATORIEDAD
Cuando una molécula choca contra el vagón, la barrera de paso evita que retroceda. Por tanto, las moléculas barrera incrementan las probabilidades de que el vagón avance.

4 DESPRENDIMIENTO DE LAS BARRERAS
La solución provoca regularmente la descomposición de las moléculas barrera, de forma que la molécula vagón puede seguir avanzando. Cada paso es aleatorio y absorbe la energía necesaria del movimiento browniano. El desprendimiento de las barreras también requiere energía, como establece la segunda ley de la termodinámica.



de diodos no varía con el tamaño, conforme a lo esperado. Dichos motores podrían ser muy poderosos con un tamaño de sólo decenas de micras, el de una célula humana.

Gracias a los avances técnicos en los circuitos integrados, en la actualidad es posible fabricar diodos muy por debajo de la microescala. Hace ya tiempo que se sintetizaron diodos de dos o tres nanómetros de longitud. Por tanto, en teoría ya es posible fabricar bisturís microscópicos compuestos por elementos de propulsión, dirección y detección estampados en diminutos circuitos integrados de silicio. Se podrían diseñar bisturís alimentados por diodos dirigidos por control remoto mediante campos eléctricos de radiofrecuencia, campos que no absorbe el cuerpo humano. Los bisturís podrían transportarse con una aguja fina y guiarse por control remoto hasta el objetivo.

Científicos (y escritores de fantasía científica) vienen soñando con las nanomáquinas al menos desde 1959, cuando Richard P. Feynman reflexionó sobre el límite inferior de las dimensiones de las máquinas y de los sistemas de almacenamiento de información en una conferencia visionaria titulada "Hay mucho sitio ahí abajo". Señaló que las leyes físicas son válidas hasta la escala molecular. Por tanto, no hay ninguna razón, aparte del desafío técnico, para no construir vehículos o incluso fábricas para la producción en masa de nanomáquinas compuestas por piezas moleculares de precisión atómica.

En los decenios posteriores, la conferencia de Feynman continuó siendo fuente de inspiración para la investigación nanotecnológica. En el camino, se ha transformado el concepto de célula: se ha pasado de una sopa de enzimas que catalizaban reacciones metabólicas a un reloj suizo de precisión con nanomotores enlazados mecánicamente. Las células constituyen, pues, en muchos sentidos, las fábricas moleculares que Feynman había predicho.

Inspirándonos en los motores biológicos, hemos avanzado en el desarrollo de motores no biológicos, pero todavía hay mucho que aprender sobre las bases del movimiento catalizado en esta escala de dimensiones. Sin duda, los científicos del mañana descubrirán métodos inimaginables para explotar dichos conocimientos en las ramas de la biomedicina, la conversión de energía, la síntesis química y en otros muchos campos.

DON FOLEY

Bibliografía complementaria

LIFE AT LOW REYNOLDS NUMBER. E. M. Purcell en *American Journal of Physics*, vol. 45, n.º 1, págs. 3-11; enero, 1977.

MOLECULES, MUSCLES AND MACHINES: UNIVERSAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MOTORS. James H. Marden y Lee R. Allen en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 99, n.º 7, págs. 4161-4166; 2 de abril, 2002.

CHEMICAL LOCOMOTION. Walter F. Paxton, Shakuntala Sundararajan, Thomas E. Mallouk y Ayusman Sen en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 45, n.º 33, págs. 5420-5429; 18 de agosto, 2006.

CAN MAN-MADE NANOMACHINES COMPETE WITH NATURE BIOMOTORS? Joseph Wang en *ACS Nano*, vol. 3, n.º 1, págs. 4-9; 27 de enero, 2009.

Pagar para que el gobierno haga lo que debe hacer

El proyecto de Obama para ampliar el papel económico del gobierno, vital, tendremos que costearlo

Jeffrey D. Sachs

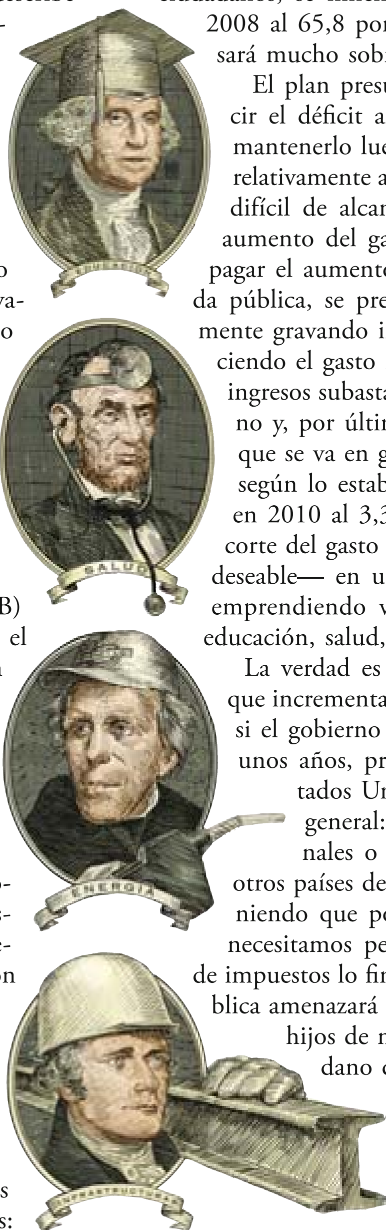
El marco presupuestario a diez años denominado "Nueva era de responsabilidad" que el presidente Obama hizo público en febrero, es tanto una filosofía de gobierno como un plan de acción fiscal. Lejos queda la teoría de Ronald Reagan de que "el gobierno no es la solución a nuestro problema; el gobierno es el problema". Obama ve, con acierto, que ampliar el papel del gobierno es vital para afrontar el desafío del desarrollo sostenible en el siglo XXI.

La disciplina conocida como economía pública describe por qué el gobierno es tan necesario como los mercados en la asignación de recursos. Entre sus razones se cuentan la asistencia a los pobres por medio de una red de protección social; la corrección de externalidades, como las emisiones de gases de efecto invernadero; la provisión de bienes, como la atención médica y la educación, que la sociedad considera imprescindibles para todos; y la financiación de la investigación científica y técnica que no puede ser cubierta eficazmente por la inversión privada. En todos estos casos, el sistema de libre mercado tiende a proporcionar el recurso en cuestión de manera insuficiente.

Reagan llegó al poder en 1981 con un programa de reducción del sector público que proponía liberar recursos para que el mercado se hiciera cargo de su asignación. Los ingresos y gastos federales cambiaron poco, en cuanto a porcentaje de la renta nacional, desde 1981 hasta 2008: en torno al 18 por ciento del producto interior bruto (PIB) para los ingresos y del 21 por ciento del PIB para el gasto. Fue un período de déficit presupuestario en EE.UU., con un largo, crónico punto muerto entre quienes querrían aumentar los impuestos y quienes querrían reducir el gasto. Por lo general, el público se opone a los recortes en los programas de gasto pero también se resiste a las subidas de impuestos.

El resultado es una marcada diferencia con Europa. Los ingresos del gobierno nacional y las administraciones estatales y locales en EE.UU. son de alrededor del 33 por ciento del PIB, en comparación con el 45 por ciento de Europa; el gasto supone el 39 por ciento del PIB en EE.UU. y el 46 por ciento en Europa. Pero como los impuestos en EE.UU. son incluso más bajos que el gasto en cuanto a porcentaje del PIB, los déficit de EE.UU. son crónicamente más altos.

El plan presupuestario de Obama se centra en áreas que la economía pública identifica como prioritarias: salud, educación, infraestructura pública e investigación y desarrollo, especialmente en energías sostenibles; en todas ellas EE.UU. va a la zaga, y de forma apreciable, de muchas partes de Europa. La visión del presidente de ampliar el papel del estado es acertada y transformadora, pero la financiación será complicada. El déficit alcanzará este año la desorbitada cantidad de 1,75 billones de dólares, o el 12 por ciento del PIB. En el plan, la deuda del gobierno, que recaerá sobre los ciudadanos, se hinchará del 40,8 por ciento del PIB en 2008 al 65,8 por ciento en 2013, porcentaje que pesará mucho sobre el presupuesto durante años.



El plan presupuestario de Obama pretende reducir el déficit al 3 por ciento del PIB para 2013 y mantenerlo luego estable hasta 2019. Este déficit es relativamente alto, pero incluso ese objetivo será muy difícil de alcanzar y mantener. Con el importante aumento del gasto para prestaciones sociales y para pagar el aumento de intereses sobre la creciente deuda pública, se pretende recortar este déficit principalmente gravando impuestos más altos a los ricos, reduciendo el gasto militar en Irak y Afganistán, creando ingresos subastando permisos de emisiones de carbono y, por último, recortando el porcentaje del PIB que se va en gastos no militares discrecionales (que según lo establecido disminuirá del 4,7 por ciento en 2010 al 3,3 por ciento en 2019). Semejante recorte del gasto no militar parece improbable —e indeseable— en un momento en que el gobierno está emprendiendo varios programas muy necesarios en educación, salud, energía e infraestructuras.

La verdad es que EE.UU., como Europa, tendría que incrementar sus ingresos algunos puntos del PIB, si el gobierno quiere expandir su papel. Dentro de unos años, probablemente serán necesarios en Estados Unidos nuevos impuestos de aplicación general: quizás impuestos sobre ventas nacionales o sobre el valor añadido, como los de otros países de altos ingresos. Si continuamos suponiendo que podemos tener el gobierno fuerte que necesitamos pero sin que los ingresos provenientes de impuestos lo financien, la acumulación de deuda pública amenazará el bienestar de nuestros hijos y de los hijos de nuestros hijos. Ningún padre o ciudadano debería considerar este planteamiento aceptable.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia (www.earth.columbia.edu)

MATT COLLINS

El año del gorila

Hugo Sarmento

En 2009 se celebra el año del gorila. El objetivo de esta iniciativa internacional es alertar a la opinión pública del declive vertiginoso observado durante los últimos años en las poblaciones de estos primates.

Existen dos grandes grupos de gorilas: los que habitan en los bosques medios y altos de Africa oriental (*Gorilla beringei*) y los que medran en las planicies de Africa occidental (*Gorilla gorilla*). La población de gorilas del este de Africa (estimada en menos de 17.600 individuos, de los cuales quedan sólo 680 de la subespecie *Gorilla beringei beringei*, el gorila de montaña) sufre la caza furtiva y la reducción de su hábitat natural, consecuencia de la elevada densidad de población humana de la región, una de las más altas de Africa.

El último censo de las poblaciones de gorilas de las llanuras se estima en menos de 95.000 individuos, pero no ha considerado los efectos de un brote reciente del virus Ebola, que está devastando una parte importante de la comunidad. Amén de este brote epidémico, la comercialización de carne de animales salvajes sigue siendo en esa región un factor importante de la caída demográfica, sin olvidar la deforestación con fines comerciales de maderas tropicales. El futuro se anuncia sombrío para la supervivencia de los gorilas. ¿Estamos aún a tiempo de salvar esta especie tan emblemática?

1. Los gorilas presentan una distribución muy restringida. Se hallan confinados en determinadas zonas muy concretas del continente africano, como la región de los volcanes Virunga (entre la República Democrática del Congo, Ruanda y Uganda), con su particular vegetación, típica de bosque ecuatorial de altitud (al fondo, el lago Kivu).



▸ 2. Un gorila espalda plateada (macho adulto dominante) pesa entre 140 y 200 kilogramos; mide cerca de 1,80 metros. Su ADN es idéntico al nuestro en un 97 o 98 por ciento; sólo los del chimpancé y del bonobo le ganan en semejanza.



◄ 3. Los gorilas viven en familias, que pueden alcanzar varias decenas de individuos. Cada hembra puede tener una cría sólo cada 4 años. Por ello, la pérdida de un individuo acarrea consecuencias dramáticas para la supervivencia de la especie.



► 4. El gorila es el mayor de los primates. Su dieta es herbívora, pero pueden ingerir algunos insectos que se encuentran en la vegetación.

Cromosomas parásitos

Los cromosomas parásitos invaden los genomas eucariotas. Se establece una carrera de armamentos caracterizada por la evolución, en ambas partes, de diversos mecanismos de ataque y defensa

Josefa Cabrero y Juan Pedro M. Camacho

CONCEPTOS BASICOS

- Además de los cromosomas normales, los genomas eucarióticos contienen otros pasajeros cromosómicos que no contribuyen a la construcción y mantenimiento del organismo.
- Estos cromosomas adicionales (B) se comportan como parásitos que logran transmitirse en mayor medida que los cromosomas normales (A), invadiendo así las poblaciones a pesar de ser deletéreos.
- El genoma hospedador responde mediante la neutralización de los invasores. Pero durante ese lento proceso de extinción, los cromosomas B pueden mutar y recuperar su ventaja. Ocasionalmente, podrían sufrir cambios que les permitiesen convertirse en elementos cooperadores.

Los sistemas biológicos se hallan expuestos a la explotación por parásitos. Los encontramos en bacterias, hongos, plantas y animales. Incluso en elementos simples, como virus y transposones. Con frecuencia se establecen relaciones parasitarias en cadena: parásitos que son parasitados por otros parásitos, que, a su vez, son parasitados por otros, etcétera.

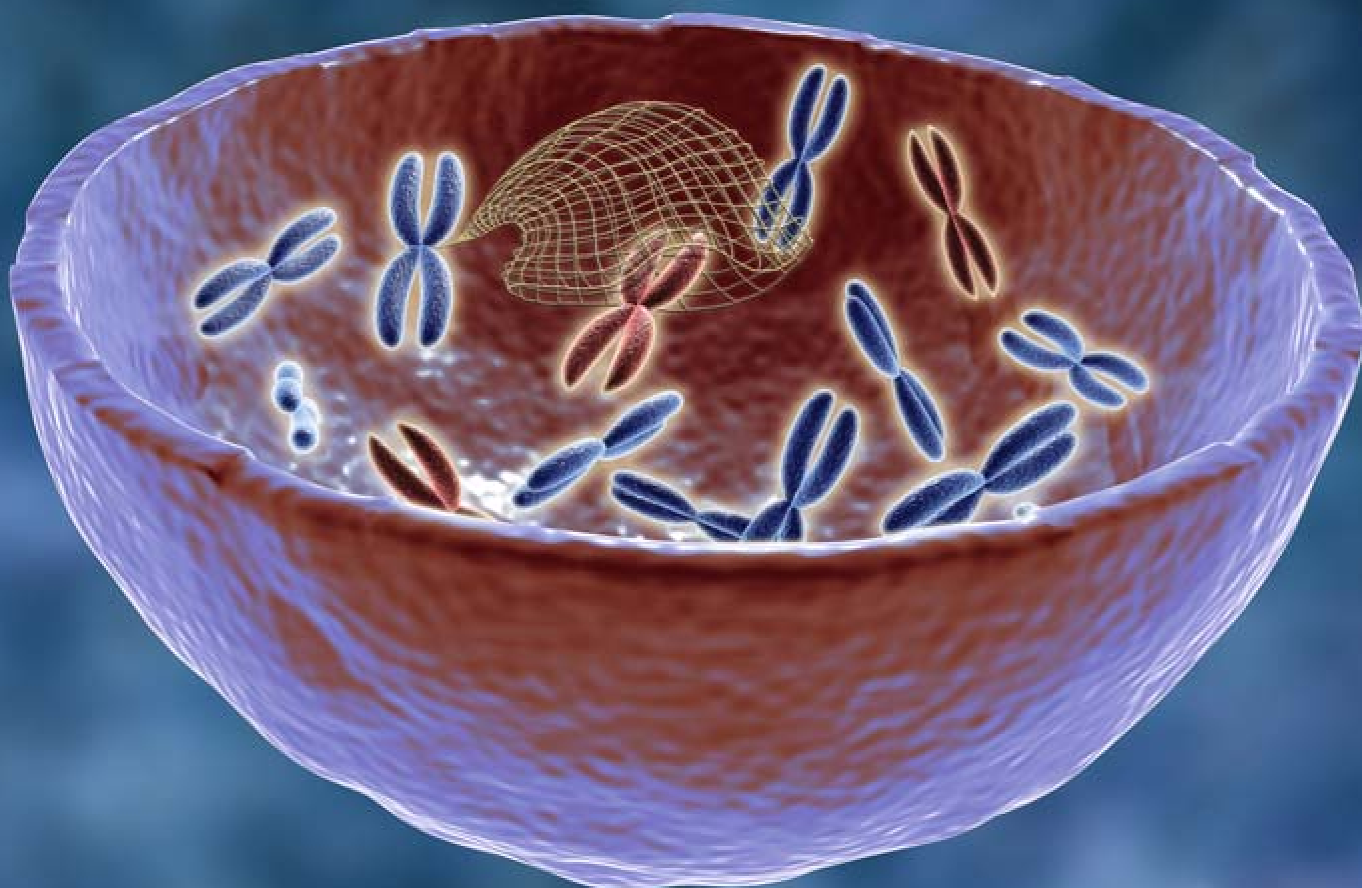
Ante este panorama, resulta sorprendente la evolución de organismos complejos. ¿Cómo han superado los incontables episodios de explotación que se han venido produciendo desde el origen de la vida? La solución se esconde en la agrupación de genes en sociedades (genomas), que proporcionan a los socios (genes) una eficacia biológica mayor que la individual, es decir, que refuerza la capacidad de resistencia ante el ataque del parásito. El genoma puede considerarse un fenómeno de mutualismo, resultante de la cooperación entre genes que obran juntos para construir organismos con capacidad de afrontar cambios ambientales y de transmitir esos genes a generaciones posteriores.

Para el buen funcionamiento de esa "sociedad génica", los genomas se atienen a un conjunto de leyes que garantizan el trato igualitario entre genes. La ley de la segregación mendeliana determina que cada uno de los dos alelos de un heterocigoto vaya al 50 por ciento de los gametos (células sexuales). La división celular que conduce a la formación de los gametos (meiosis) garantiza el reparto equitativo de los cromosomas y, por tanto, de los genes.

Cuando un genoma es atacado por alguno de esos elementos egoístas, se genera un conflicto genético entre cooperadores y egoístas, que inician una carrera de armamentos. Así lo predice la hipótesis de la Reina Roja, personaje de ficción de Lewis Carroll que llevaba en volandas a Alicia y no paraba de correr para permanecer en el mismo sitio. Fue Leigh Van Valen, en los años setenta del siglo pasado, quien convirtió esta imagen en una hipótesis evolutiva, según la cual, en ambientes cambiantes, como el que definen parásito y hospedador, la carrera coevolutiva no puede detenerse.

Los cromosomas constituyen los vehículos que facilitan la transmisión organizada y equitativa, durante la meiosis, de los genes cooperadores. Pero los parásitos genómicos violan las leyes de la herencia de diversas formas. Algunos genes (*Segregation Distorter* en *Drosophila* y los alelos *t* en los ratones) se transmiten al 90 por ciento de los espermatozoides porque provocan el fallo en la maduración de las espermátidas que no los llevan. Otros parásitos genómicos corresponden a cromosomas enteros, que se las arreglan para transmitirse en mayor medida que el resto de los cromosomas, aprovechándose de las debilidades de los sistemas generados por los genes cooperadores. Es el caso de los cromosomas B.

Los cromosomas B (supernumerarios o accesorios) corresponden a cromosomas dispensables, adicionales a los del complemento normal (cromosomas A), que no recombinan con éstos y que muestran modos de herencia irregulares y no mendelianos. Edmund B. Wil-



son los descubrió en 1906, pero el significado biológico de los mismos ha sido un enigma durante largo tiempo. En los últimos años, se han dado pasos importantes en el conocimiento de sus propiedades biológicas, naturaleza molecular, origen y dinámica evolutiva.

La relevancia biológica de los cromosomas B era poco más que una simple anécdota hasta que G. Östergren los consideró, en 1945, parásitos del genoma A. Fue el primero en asignar a un elemento genómico un comportamiento egoísta, anticipándose en más de 30 años a las hipótesis del gen egoísta de Richard Dawkins (1976) y del ADN egoísta de W. F. Doolittle y C. Sapienza, y L. E. Orgel y F. H. C. Crick (1980). Los efectos deletéreos que ejercen numerosos cromosomas B sobre la eficacia biológica del portador y los mecanismos que facilitan su acumulación en la línea germinal guardan semejanza con el comportamiento de otros tipos de parásitos.

La visión de Östergren sobre el parasitismo generó bastante escepticismo. Coexistió durante largo tiempo con otra hipótesis alternativa, según la cual los cromosomas B persistían porque proporcionaban algún beneficio a los organismos portadores. Este modelo "heterótico" fue anticipado por C. D. Darlington en 1958 y posteriormente defendido por M. J. D. White. Da por supuesto que los cromosomas B resultan beneficiosos en bajo número pero perjudiciales en números elevados. A pesar de la existencia de algunos ejemplos de cromosomas B beneficiosos, los datos apoyan, en su mayoría, la naturaleza parásita de los cromosomas B.

Incidencia en la naturaleza

Los cromosomas B se han hallado en unas 10 especies de hongos, 1300 especies de plantas y 500 de animales. Son frecuentes sobre todo en ciertos grupos animales (saltamontes) y vegetales (Compuestas, Gramíneas y Liliáceas). Se ha estimado una frecuencia cercana al 15 por ciento para las especies portadoras de cromosomas B.

1. LOS CROMOSOMAS B (*rojo*) invaden al genoma A (*azul*), que se defiende de los cromosomas parásitos mediante la neutralización de los mismos.



2. **LA REINA ROJA, personaje de ficción de Lewis Carroll, dio nombre a una hipótesis evolutiva. Según ésta, en ambientes cambiantes, como el que definen parásito y hospedador, la carrera coevolutiva no puede detenerse.**

FUENTE: "ALICIA A TRAVES DEL ESPEJO" DE LEWIS CARROLL

Algunos organismos se muestran tolerantes con los cromosomas B. Se han hallado individuos con 50 cromosomas B en la planta *Pachyphytum fittkaui*, con 34 en el maíz, con 24 en el ratón *Apodemus peninsulae*, 20 en la mosca *Xylota nemorum* y 16 en la rana *Leiopelma hochstetteri*. Sin embargo, en la mayoría de las especies, el número de cromosomas B raramente pasa de cuatro.

Dentro de una misma especie, hallamos poblaciones que poseen cromosomas B y otras que no. Esta distribución puede seguir un patrón geográfico. El saltamontes *Myrmeleotettix maculatus* posee cromosomas B en poblaciones de Gran Bretaña, pero no de Europa continental. La langosta migratoria, en cambio, muestra cromosomas B en casi todas las poblaciones analizadas de Asia, Africa, Australia y Europa.

La frecuencia de cromosomas B en una población depende de varios factores: tasa de acumulación, magnitud de los efectos deletéreos sobre los portadores, deriva genética, número de generaciones transcurridas desde la llegada del cromosoma B a la población y facilidad de intercambio migratorio entre poblaciones. La frecuencia puede mantenerse estable a lo largo del tiempo merced a la acción opuesta de mecanismos direccionales (selección fenotípica y acumulación) o variar si la población ha sufrido recientemente la invasión de cromosomas B.

Ejemplos de invasiones recientes se han descrito en dos poblaciones naturales del saltamontes *Eyprepocnemis plorans*: en Torrox (Málaga), el cromosoma B_{24} incrementó en número medio por individuo de 0,34 a 1,53 entre 1984 y 1994; en Pollensa (Mallorca), la frecuencia del cromosoma B_1 aumentó de 0,053 a 0,692 en sólo diez años. Asimismo, en la avispa *Trypoxylon albitarse*, un cromosoma B aumentó en frecuencia de 0,133 a 0,962 en sólo cuatro generaciones.

Características biológicas

Se han descrito cromosomas B de casi todos los tamaños concebibles: desde poco más que un centrómero (en la mosca *Megaselia scalaris*) hasta mayores que los cromosomas A (en el pez *Alburnus alburnus*). No obstante, la mayoría presentan tamaños intermedios y pueden mostrar variación dentro de la misma especie.

La morfología de los cromosomas B recuerda la de los cromosomas A. Heterocromáticos en su mayoría, los cromosomas B permanecen muy condensados durante la mayor parte del ciclo celular, debido a su elevado contenido en ADN redundante de varios tipos (sobre todo ADN satélite, ADN ribosómico y elementos móviles). Los genes de copia única escasean en los cromosomas B.

La ventaja obtenida por los cromosomas B durante su transmisión suele denominarse "mecanismo de acumulación", "impulso meiótico", cuando tiene lugar durante la meiosis o, simplemente, "impulso" si se produce antes o después de la meiosis. El impulso convierte a los cromosomas B en elementos egoístas; constituye su principal arma para invadir los genomas hospedadores, establecerse en las poblaciones y mantenerse durante largos períodos de tiempo. Jim Birchler y su grupo, de la Universidad de Missouri, han demostrado que el cromosoma B del maíz sigue presente en el genoma desde hace más de cinco millones de años.

Los mecanismos premeióticos de acumulación implican el incremento, durante el desarrollo, del número de cromosomas B en las células de la línea germinal. Para ello es necesaria la generación de variación intraindividual del número de cromosomas B (mediante su inestabilidad mitótica durante el desarrollo) y el destino preferencial de las células con número incrementado de cromosomas B hacia la línea germinal. Ese tipo de mecanismo fue propuesto por Uzi Nur, de la Universidad de Rochester, en 1966; se ha observado en animales y plantas.

El impulso meiótico se da sobre todo en las hembras. Se basa en la asimetría funcional de los productos meióticos: una de las dos células hijas en cada una de las dos divisiones meióticas degenera en forma de corpúsculo polar. Los alelos de los genes sometidos a las leyes mendelianas migran de forma indistinta a la célula viable o al corpúsculo polar. Los cromosomas B, en cambio, migran con preferencia hacia la célula viable (no hacia el corpúsculo polar), lo que incrementa su grado de representación en los óvulos y, por

tanto, la tasa de transmisión, que supera el 50 por ciento mendeliano. El mecanismo se ha observado en plantas y animales.

El impulso postmeiótico se ha descrito en plantas. Durante las mitosis de maduración del grano de polen, las dos cromátidas del cromosoma B van al núcleo generativo (que posteriormente participará en la fecundación), a diferencia de los cromosomas A, que separan sus dos cromátidas a los polos generativo y vegetativo.

Modos de origen

El origen más lógico de los cromosomas B se halla en el propio genoma A. La aneuploidía en forma de cromosomas A extra constituye una de las fuentes principales de cromosomas B. Muchos cromosomas A extra adquieren pronto una configuración compacta (heterocromatinización) y se inactivan genéticamente; en su aspecto y comportamiento meiótico recuerdan a los de muchos cromosomas B. Este proceso conlleva la acumulación de ADN repetitivo de diversos tipos, que les diferencia del cromosoma A originario; de ahí que los cromosomas B nunca se apareen, durante la meiosis, con los cromosomas A.

El cromosoma A extra convertido en cromosoma B puede proceder del genoma A de la misma especie o bien del genoma A de una especie distinta. El origen de los cromosomas B puede ser, por tanto, intraespecífico o interespecífico. La existencia de secuencias de ADN compartidas por cromosomas A y B sugiere un origen intraespecífico. En cambio, la mayor homología de secuencias de ADN de un cromosoma B con un cromosoma A de una especie distinta apunta hacia un origen interespecífico. La incidencia de cada tipo de origen depende del organismo, de su dinámica cromosómica (facilidad de generación de cromosomas A extra) y de la probabilidad de hibridación interespecífica.

Existen ejemplos de ambos procesos. Se han hallado cromosomas B de origen intraespecífico en las plantas *Crepis capillaris* y *Brachychome dichromosomatica*, así como en diversas especies de animales: el mosquito *Chironomus plumosus*, la mosca *Drosophila subsilvestris*, los mamíferos *Petauroides volans* y *Reithrodontomys megalotis*, el saltamontes *Eyprepocnemis plorans*, varias especies de moscas *Glossina* y la rana *Leiopelma hochstetteri*. El origen interespecífico se ha demostrado para los cromosomas B de la avispa *Nasonia vitripennis*: la filogenia molecular de un retrotransposón (*NATE*) indica que el cromosoma B ha sido transferido recientemente a esta

Los autores

Josefa Cabrero y **Juan Pedro Martínez Camacho** son profesores del departamento de genética de la Universidad de Granada. Centran su investigación en los cromosomas parásitos, desde el nivel molecular hasta el poblacional. En 1997 propusieron un modelo sobre la evolución de tales cromosomas.

EL IMPULSO MEIOTICO

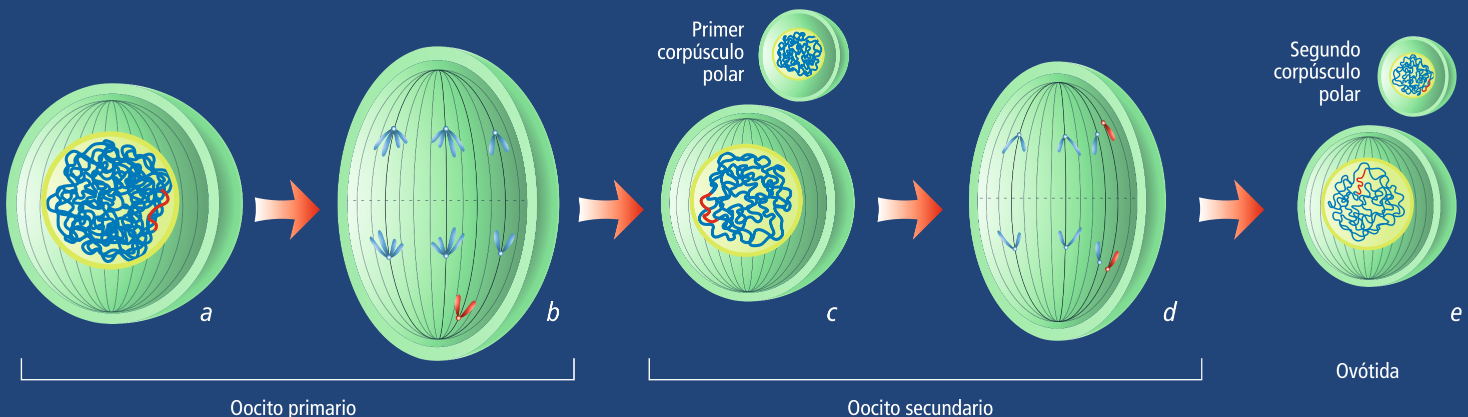
La meiosis conduce a la formación de los gametos (óvulos o espermatozoides, según el sexo), células con la mitad de cromosomas (haploides) que, al fusionarse en la fecundación, restituyen el número diploide de cromosomas.

Durante la oogénesis (formación de los óvulos), cada cromosoma A (*azul*) se aparea con su homólogo y se segregan hacia polos opuestos: las dos cromátidas que en el oocito primario (*b*) se hallan unidas por un centrómero común, en el oocito secundario (*d*) se separan hacia polos opuestos. Como resultado, cada miembro de una pareja de cromosomas A (y los genes contenidos en ellos) tienen un 50 por ciento de probabilidad de quedar integrados en el polo viable (oocito secundario) y un 50 por ciento de perderse con el primer corpúsculo polar.

Este comportamiento, junto con una probabilidad de fecundación similar para los gametos que reciben cada alelo (o cromosoma A homólogo) en un heterocigoto, constituye la base de la ley mendeliana de la segregación.

CROMOSOMAS B: INFRACTORES DE LA LEY MENDELIANA

Los cromosomas B (*rojo*), en cambio, suelen presentar un comportamiento individual (univalentes). Muestran preferencia por integrarse en el oocito secundario (*c*) en vez de en el primer corpúsculo polar. Obtienen así tasas de transmisión superiores al 50 por ciento que marca la ley mendeliana.







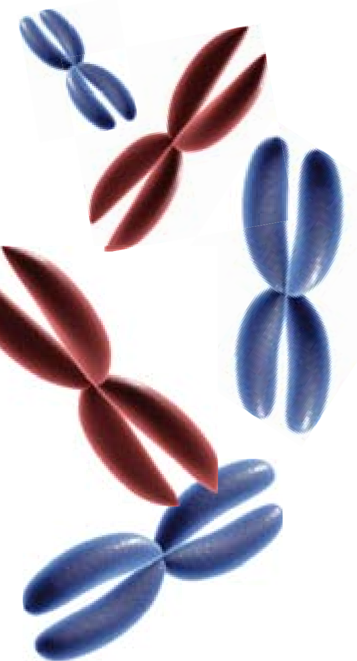
3. VARIAS ESPECIES DE SALTAMONTES son portadoras de cromosomas B: entre otras, *Eyprepocnemis plorans* (*izquierda*) y *Myrmeleotettix maculatus* (*derecha*).

FRANCESC XAVIER YUSTE MEDINA (*izquierda*); G. U. TOLKIEHN (*derecha*)

especie desde una especie del género *Trichomalopsis*. Otros ejemplos de cromosomas B de origen interespecífico se han descrito en plantas del género *Coix* y en el pez ginogenético *Poecilia formosa*.

La siguiente cuestión consiste en averiguar a partir de qué cromosoma A surgió determinado cromosoma B. Basados en indicios sobre la mayor homología de algunos cromosomas A con los B, se ha sugerido que el cromosoma B del maíz derivó del cromosoma 4. En 2002, en el grupo de Manoj K. Dhar, de la Universidad hindú de Jammu, fueron testigos del origen de un cromosoma B a partir del cromosoma 2 de la planta *Plantago lagopus*, en el transcurso de unos experimentos de laboratorio y en sólo dos generaciones.

Al no resultar esenciales para la vida del hospedador, los cromosomas B pueden constituir verdaderos paraísos para los transposones, que se acumulan sin resultar deletéreos. Puesto que los elementos móviles pueden considerarse parásitos moleculares, los que residen en los cromosomas B corresponden a parásitos de parásitos. En el caso de los SINE (de "short interpersed nuclear elements", elementos nucleares cortos y dispersos), que parasitan la maquinaria de transposición de los LINE (de "long interpersed nuclear elements", elementos nucleares largos y dispersos), nos hallamos ante parásitos de parásitos de parásitos. Para añadir otro eslabón a esta cadena de explotación parasitaria, reparemos en que algunos cromosomas parásitos se encuentran, a su vez, en animales parasitoides; por ejemplo, la avispa *Nasonia vitripennis*, que pone sus huevos en larvas de dípteros y las destruye.



Efectos sobre el genoma hospedador

Los cromosomas B suelen pasar inadvertidos cuando se hallan en un número muy limitado. Si abundan, en cambio, pueden resultar deletéreos y reducir la viabilidad, la fertilidad o ambas. La fertilidad es muy sensible a la presencia de cromosomas B; se han descrito una gama extensa de efectos a varios niveles, del génico al poblacional.

Revisten especial interés los efectos de los cromosomas B sobre la expresión génica de los cromosomas A. En 1980, Manuel Ruiz Rejón y su grupo, de la Universidad de Granada, inauguraron la lista de hallazgos: descubrieron un gen de esterasas que se expresa en la planta *Scilla autumnalis* sólo en presencia de un cromosoma B [*véase* "Evolución de los cromoso-



mas B", de Manuel Ruiz Rejón, Carmelo Ruiz Rejón y José L. Oliver, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 1987]. En 1994, A. Plowman y S. Bougourd, de la Universidad de York, hallaron un resultado similar en el ajo silvestre (*Allium schoenoprasum*). En 2005, el grupo de Mladen Vujosevic, del Instituto de Investigación Biológica Sinisa Stankovic en Belgrado, demostró la expresión diferencial de tres genes del ratón de campo (*Apodemus flavicollis*) en individuos con y sin cromosomas B.

Las células con cromosomas B muestran, debido al ADN extra, que la presencia de éstos supone un tamaño mayor y un ciclo celular más lento. En la chinche de la harina *Pseudococcus affinis* y el saltamontes *M. maculatus*, este efecto celular se manifiesta a través de un enlentecimiento del desarrollo. También la presencia de cromosomas B repercute en la cantidad de ARN y de proteínas nucleares.

Los efectos sobre el fenotipo externo, en cambio, son raros. En la planta *Haplopappus gracilis*, la presencia de cromosomas B causa el cambio de color de las semillas; en el maíz, el desarrollo de hojas rayadas.

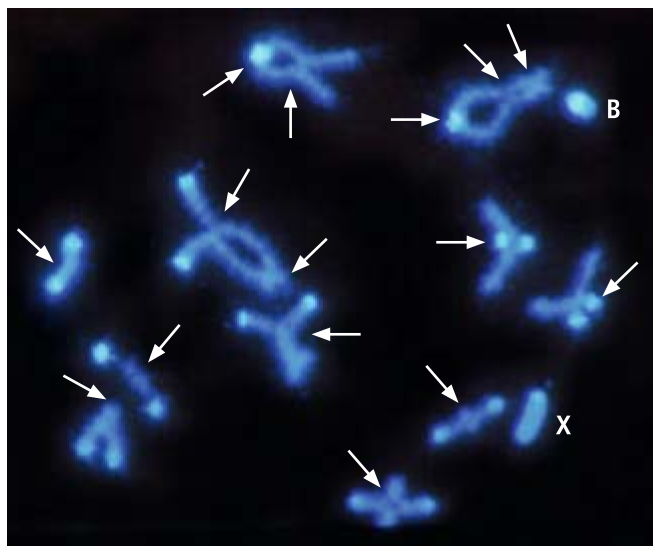
En las avispas parasitoides *Nasonia vitripennis* y *Trichogramma kaykai*, el cromosoma B influye sobre la determinación sexual: tras destruir la dotación cromosómica paterna a excepción del cromosoma B, transforma en machos haploides los cigotos diploides que iban a ser hembras. Parece que este efecto depende de ADN redundantes que secuestran proteínas necesarias para el procesamiento cromosómico normal en los huevos fecundados. Dada la riqueza en ADN repetitivo en la mayoría de los cromosomas B, quizá muchas de las asociaciones funcionales y efectos reguladores de estos cromosomas sobre caracteres fenotípicos operen mediante ese tipo de interferencia celular.

A los cromosomas B se deben ciertos efectos fisiológicos: resistencia a la roya en la planta *Avena sativa* y resistencia a antibióticos en el hongo *Nectria haematococca*. Los cromosomas B pueden afectar al vigor, la fertilidad y la fecundidad. En la mayoría de los casos, son deletéreos para el portador; pero en otros resultan beneficiosos: incrementan la patogenicidad del hongo *N. haematococca* y la viabilidad de semilla a plántula en el ajo silvestre (*A. schoenoprasum*).

Abundan los efectos endofenotípicos. Suele citarse, a este respecto, la alteración, en los cromosomas A, de la frecuencia de quiasmas (entrecruzamientos entre cromosomas homólogos) y, en consecuencia, de la tasa de recombinación de tales cromosomas. En general, la frecuencia de quiasmas aumenta; pero se han hallado casos en que disminuye o no se ve alterada. ¿Cómo explicar efectos tan opuestos?

En 1990, Graham Bell y Austin Burt, de la Universidad McGill de Montreal, propusieron que la presencia de cromosomas parásitos favorecía el incremento de la frecuencia de quiasmas porque con ello se generaba más progenie recombinante, parte de la cual podía mostrarse resistente a la acumulación del cromosoma parásito en la línea germinal. Esta respuesta, la "recombinación inducible", corresponde a un caso especial de la hipótesis de la "Reina Roja", que predice que la recombinación debe intensificarse en condiciones de dificultad.

Nuestra investigación sobre el saltamontes *E. plorans* ha venido en apoyo de la recombinación inducible. El incremento en la frecuencia de quiasmas producido por los cromosomas B es mayor en poblaciones con cromosomas B parasíticos que en poblaciones con cromosomas B neutralizados.





JOSEFA CABRERO Y JUAN PEDRO M. CAMACHO

4. CROMOSOMAS B en el saltamontes *Eyprepocnemis plorans*. Durante la meiosis muestran un comportamiento similar al del cromosoma X: presentan un grado de condensación elevado que les distingue de los cromosomas bivalentes autosómicos (*izquierda*). La presencia de cromosomas parásitos aumenta en *E. plorans* la frecuencia de quiasmas, entrecruzamientos entre cromosomas homólogos (*flechas*). Mediante una tinción especial (bandeo C), los cromosomas B resaltan entre los cromosomas A por su mayor contenido en heterocromatina (*derecha*).

ORGANISMOS EN LOS QUE SE HAN HALLADO CROMOSOMAS B

HONGOS

Nectria haematococca ▼



PLANTAS

Aegilops y *Tiricum*
Brachychome dichromosomatica
Crepis capillaris
Plantago lagopus
Secale cereale
Zea mays ▼



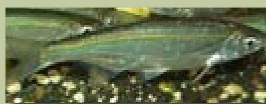
INSECTOS

Myrmeleotettix maculatus
Eyprepocnemis plorans
Pseudococcus affinis
Glossina austeni
Glossina morsitans morsitans
Glossina pallidipes
Drosophila subsilvestris
Nasonia vitripennis ▼



PECES

Alburnus alburnus ▼



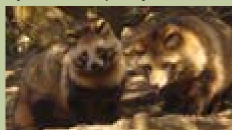
Astyanax scabripinnis

ANFIBIOS

Dicamptodon tenebrosus
Leiopelma hochstetteri

MAMIFEROS

Apodemus peninsulae
Nectomys squamipes
Nyctereutes procyonides ▼



Petauroides volans
Rattus rattus

M. E. CLARK (*Nasonia vitripennis*); PIET SPAANS (*Alburnus alburnus*); 663HIGHLAND (*Nyctereutes procyonides*)

Uno de los aspectos más enigmáticos de los cromosomas B corresponde al patrón par-impar que se observa en muchos de sus efectos. En ese fenómeno repararon R. N. Jones y H. Rees, en 1967. Descubrieron que la varianza entre células para el número de quiasmas en el centeno era mayor en las plantas con número impar de cromosomas B.

Se ha informado de patrones par-impar semejantes, en plantas y animales, para la frecuencia de quiasmas, frecuencia de espermátidas aberrantes (micro y macroespermátidas), masa seca nuclear, cantidad de proteína y de ARN, caracteres morfológicos externos y fertilidad. En general, los números impares de cromosomas B causan mayores efectos sobre el organismo portador, quizá porque rompen la estabilidad de los genomas diploides, con número par de cromosomas.

Dinámica evolutiva

Muchos cromosomas parásitos muestran en las poblaciones naturales una frecuencia estable a lo largo del tiempo, fruto de un equilibrio entre el incremento de frecuencia derivado de la acumulación de cromosomas B y el decremento producido por la selección fenotípica sobre los individuos portadores, originada por los efectos deletéreos de los cromosomas B. Este equilibrio corresponde a una predicción del modelo parasítico, desarrollado en 1961 por Mooto Kimura e Hiroshi Kayano, de la Universidad de Kyushu; pero puede romperse por la evolución, en los cromosomas A, de genes supresores de la acumulación de cromosomas B. Conforme aumenta la frecuencia de esos genes, la acumulación de cromosomas B disminuye acercándose al valor mendeliano (0,5); los cromosomas B se convierten así en elementos más o menos neutros, que evolucionan por deriva genética y selección fenotípica contra los individuos dotados de un número elevado de cromosomas B. Dado que los cromosomas B no despliegan un comportamiento meiótico regular, la deriva genética no puede fijarlos en la población; sólo puede eliminarlos (están condenados a desaparecer).

Como propusimos en 1997, el ciclo biológico de un cromosoma parásito consta de tres etapas: invasión (por acumulación, en pocas generaciones), supresión de la acumulación (respuesta evolutiva del genoma A que puede durar decenas de generaciones) y etapa "cuasineutra" (la más larga, que puede durar centenares o miles de generaciones).

Pero no todos los cromosomas parásitos siguen dicha trayectoria evolutiva. Para que puedan hacerlo, se requiere que la carrera de armamentos de los cromosomas A y B disponga de los mecanismos de ataque y defensa apropiados. El primer ataque del cromosoma B se realiza mediante su acumulación. El genoma A se defiende entonces mediante genes supresores de la acumulación del genoma B. Si los genes supresores no son lo bastante eficaces, los cromosomas B pueden permanecer en el estado de equilibrio que predice el modelo parasítico.

En su camino hacia la extinción, los cromosomas parásitos neutralizados pueden sufrir mutaciones que restituyen su capacidad de acumulación; se origina así una nueva variante parásita que comienza un nuevo ciclo biológico. En el saltamontes *E. plorans* la tasa de mutación de los cromosomas B es cercana al 0,5 por ciento en poblaciones españolas y marroquíes. En el curso de nuestra investigación hemos sido testigos de la sustitución, en esta especie, de un cromosoma B neutralizado por una variante parásita en la población malagueña de Torrox.

Quizá la mejor prueba de que los cromosomas B pueden tener una vida larga sea la presencia de cromosomas B semejantes en especies estrechamente emparentadas. Tal vez los cromosomas B se encontraban ya en el antecesor común o pudo darse a lo mejor una hibridación interespecífica reciente. Se han descubierto cromosomas B similares en dos especies de plantas del género *Secale*, en varios ratones de campo del género *Apodemus* y en ratas del género *Rattus*. Los cromosomas parásitos son más frecuentes en las poblaciones que viven en ambientes favorables para los organismos portadores.

También es posible la evolución de atenuación en los cromosomas parásitos. Aunque ocasionalmente podrían transmitirse entre especies por hibridación (transmisión horizontal), los cromosomas B suelen ser parásitos de transmisión estrictamente vertical, por la línea germinal (de padres a hijos), condición que vincula su aptitud a la del hospedador. De ello se esperaría que los cromosomas B evolucionasen hacia un cierto grado de benignidad con el hospedador, atenuando sus efectos deletéreos.

Un indicio de la atenuación de los cromosomas parásitos es su eliminación de los tejidos somáticos, con la consiguiente disminución de sus efectos deletéreos. Se han descrito cromosomas B restringidos a la línea germinal en el marsupial *Echymipera kalabu* y en el pez *Eptatretus okinoseanus*.

Resistencia del genoma hospedador

La resistencia del genoma hospedador a la invasión por los cromosomas parásitos se asocia a su capacidad para amortiguar los efectos deletéreos. La estrategia obvia estribaría en eliminar los cromosomas B.

Una prueba indirecta de esa resistencia proviene de las tasas de transmisión de los cromosomas B, que varían de un individuo a otro. Hay pruebas de tal variabilidad en el centeno, *Festuca pratensis*, el maíz e *Hypochoeris maculata*, y en el saltamontes *M. maculatus*. En este último, Michael W. Shaw y Godfrey M. Hewitt, de la Universidad de East Anglia, demostraron en 1985 la existencia de genes supresores de la acumulación de los cromosomas B. El mismo año, Uzi Nur y Betty Lou H. Brett, de la Universidad de Rochester, hacían lo propio en la chinche de la harina (*Pseudococcus affinis*).

El grupo de María Jesús Puertas, de la Universidad Complutense de Madrid, obtuvo, en 1991, mediante selección artificial, líneas de centeno con distinta tasa de transmisión de cromosomas B; más tarde demostraron que los genes que controlan la transmisión del cromosoma B se alojaban en éste. Demostraron también que en el maíz, el control génico de la no-disyunción mitótica del cromosoma B (responsable de uno de sus dos mecanismos de acumulación) se debe a una región del cromosoma B.

Además, cuando los cromosomas B se transmiten por el progenitor masculino, el control génico de la fecundación preferencial (el otro mecanismo de impulso postmeiótico) se debe a un gen de los cromosomas A (*mBt*); otro gen (fBt^{l}) parece favorecer la eliminación meiótica de los cromosomas B univalentes por el progenitor femenino. Esta compleja serie de interacciones génicas entre cromosomas A y B convierten al maíz en uno de los mejores ejemplos de coevolución entre cromosomas parásitos y genoma hospedador.

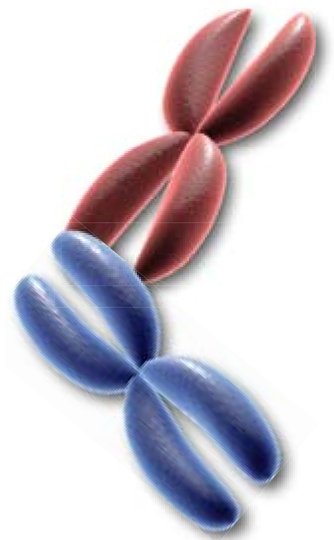
En las especies donde los cromosomas B no muestran acumulación, puede acontecer que haya sido suprimida por el genoma A. Para comprobarlo, se procede a romper la coadaptación genética del sistema mediante cruzamientos entre individuos procedentes de poblaciones con y sin cromosomas B. A través de ese método demostramos, en 1996, que los cromosomas B del saltamontes *E. plorans* correspondían a cromosomas parásitos que han sido neutralizados. En cromosomas B mitóticamente inestables (que muestran variación intraindividual en número), la supresión de la acumulación puede consistir en la estabilización del comportamiento mitótico del cromosoma B, tal como hemos observado en el pez *P. lineatus*.

Mutualismo e integración en el genoma A

Puesto que los cromosomas parásitos tienen una vida larga, podrían desarrollar alguna propiedad beneficiosa para el genoma hospedador, convirtiéndose en mutualistas. Hace 45 años, Mooto Kimura y Hiroshi Kayano sugirieron que un cromosoma B puede resultar beneficioso cuando se encuentra en número bajo por individuo, aunque resulte perjudicial a números elevados.

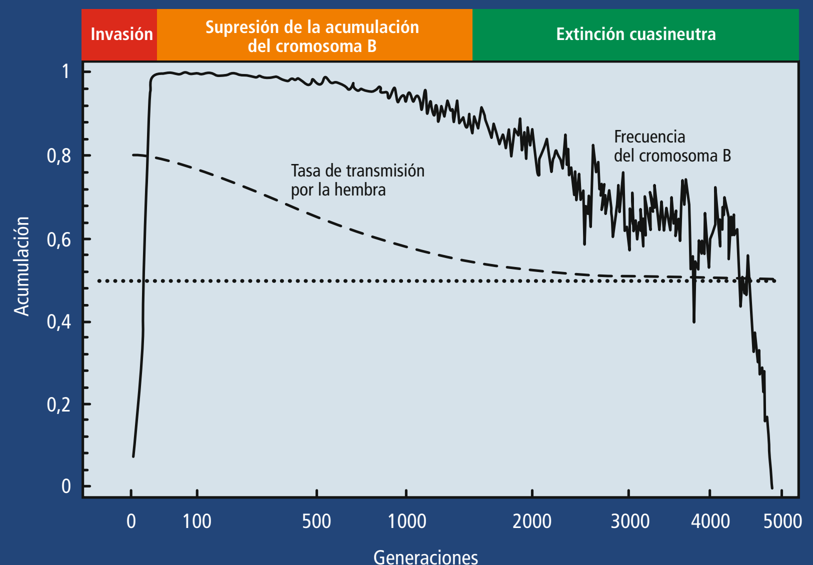
El grupo de Susan M. Bougourd ha hallado en el ajo silvestre pruebas evolutivas en favor de cromosomas B mutualistas: ha demostrado que los cromosomas B carecen de mecanismo de acumulación, pero benefician a los individuos portadores al mejorar la viabilidad de semilla a plántula y, por tanto, la germinación.

Otro destino potencial de los cromosomas B es su integración en el genoma hospedador, para convertirse en una pareja más de cromosomas estándar. Esta posibilidad fue sugerida en 1972 por Gabriel A. Dover y Ralph Riley, del Instituto de Propagación Vegetal en Cambridge. Propusieron que el gen 5B que controla el apareamiento cromosómico en el trigo pudo surgir mediante la integración en el genoma del trigo de un segmento de un cromosoma B de *Aegilops*.



Ciclo biológico de un cromosoma parásito

El ciclo biológico de un cromosoma parásito consta de tres etapas. Primero, el cromosoma B invade, por acumulación y en escasas generaciones, el genoma A. El genoma A se defiende luego mediante variantes genéticas que suprimen la acumulación del cromosoma B (respuesta evolutiva que puede durar decenas de generaciones). Ello conduce a la disminución de la tasa de transmisión del cromosoma B a través de la hembra (*curva discontinua*); cuando ésta se aproxima a 0,5 (valor mendeliano, *línea de puntos*), el cromosoma B comienza su etapa "cuasineutra" (la más larga, que puede durar centenares o miles de generaciones), que conduce a su extinción. En ocasiones, la elevada tasa de mutación de los cromosomas parásitos posibilita la aparición de nuevas variantes invasoras (con acumulación); se cierra así un ciclo que puede repetirse una y otra vez, prolongando la vida de los cromosomas B.



JOSEFA CABRERO Y JUAN PEDRO M. CAMACHO

Evolución a largo plazo de los cromosomas parásitos



La integración podría seguir varios caminos. En primer lugar, el cromosoma B, o parte de él, podría translocarse a un cromosoma A para convertirse en un bloque heterocromático propio del genoma A. Bloques de ese tipo, con secuencias de ADN similares a las de cromosomas B, se han encontrado en el saltamontes *E. plorans* y la planta *B. dichromosomatica*. Aunque el grupo de Juan Luis Santos, de la Universidad Complutense de Madrid, y el nuestro hemos observado en poblaciones naturales de *E. plorans* varias translocaciones recientes entre cromosomas A y B, nunca se ha hallado un polimorfismo, lo que sugiere la existencia de restricciones que impiden el éxito de estas mutaciones. Al observar ulteriormente que las translocaciones recíprocas entre cromosomas A y B provocan una infertilidad gamética y mortalidad embrionaria elevadas, resulta poco probable que las mutaciones en cuestión constituyan una vía para la integración de los cromosomas B.

Otra vía de integración corresponde a la adquisición de un comportamiento regular durante las divisiones celulares. Puesto que el comportamiento irregular constituye la base de la acumulación de los cromosomas parásitos y define su naturaleza, podríamos considerar la segunda vía de integración como una "domesticación". A través de esa vía evolutiva, los cromosomas parásitos volverían al redil sometiéndose a las leyes genómicas que velan por la igualdad en la transmisión genética.

Existe al menos un caso donde los cromosomas B parecen pasar ahora por una fase de domesticación y tienden a mostrar el mismo número que los cromosomas A (uno por genoma haploide). En poblaciones brasileñas de la avispa *Trypoxylon albitarse*, Sonia Araujo, de la Universidad de Viçosa en Brasil, halló un cromosoma B heterocromático que en la mayoría de las poblaciones tendía a mostrar esta proporción: uno en los machos (haploides) y dos en las hembras (diploides).

Así, los cromosomas B acaban pareciéndose a los cromosomas A, salvo en su naturaleza heterocromática. Pero el camino evolutivo no termina ahí. Puede que pierdan parte de esa heterocromatina y capten genes esenciales procedentes de otros cromosomas A, haciéndose imprescindibles para el genoma que los hospedó. En fecha reciente, nuestro grupo ha observado en los cromosomas B de *E. plorans* y *L. migratoria* la presencia de genes para las histonas H3 y H4; no sabemos todavía si se expresan.

Una vía alternativa de integración de los cromosomas B correspondería a la adquisición de un compañero de segregación meiótica reclutado entre los cromosomas A. El mejor candidato sería el cromosoma X univalente en organismos con mecanismo X0 de determinismo cromosómico del sexo. En algunas poblaciones de saltamontes, los cromosomas B no siempre segregan al azar con respecto al cromosoma X univalente. En una población granadina (Jete) de *E. plorans*, los univalentes X y B se mueven preferentemente a polos opuestos durante la anafase I de la espermatogénesis.

Mayor regularidad en la segregación X-B se ha demostrado en dos especies de insectos homópteros, prueba de que el cromosoma B podría haber adquirido la misma función que el cromosoma Y en las especies con determinismo XY. Este comportamiento meiótico daría lugar a cromosomas B exclusivos de los machos, lo que plantearía la posibilidad de que algunos cromosomas Y hubieran evolucionado a partir de cromosomas B. Se ha sugerido ese fenómeno para el cromosoma Y de *Drosophila*; ésta constituye una de las funciones evolutivas más creativas de los cromosomas B, que pueden comenzar siendo parásitos y terminar formando parte del genoma parasitado.

Al fin y al cabo, el origen de los eucariotas se basó en la domesticación de elementos que pudieron comenzar como parásitos y se convirtieron en parte importante del hospedador (mitocondrias y cloroplastos), proporcionando funciones clave como la respiración y la fotosíntesis.

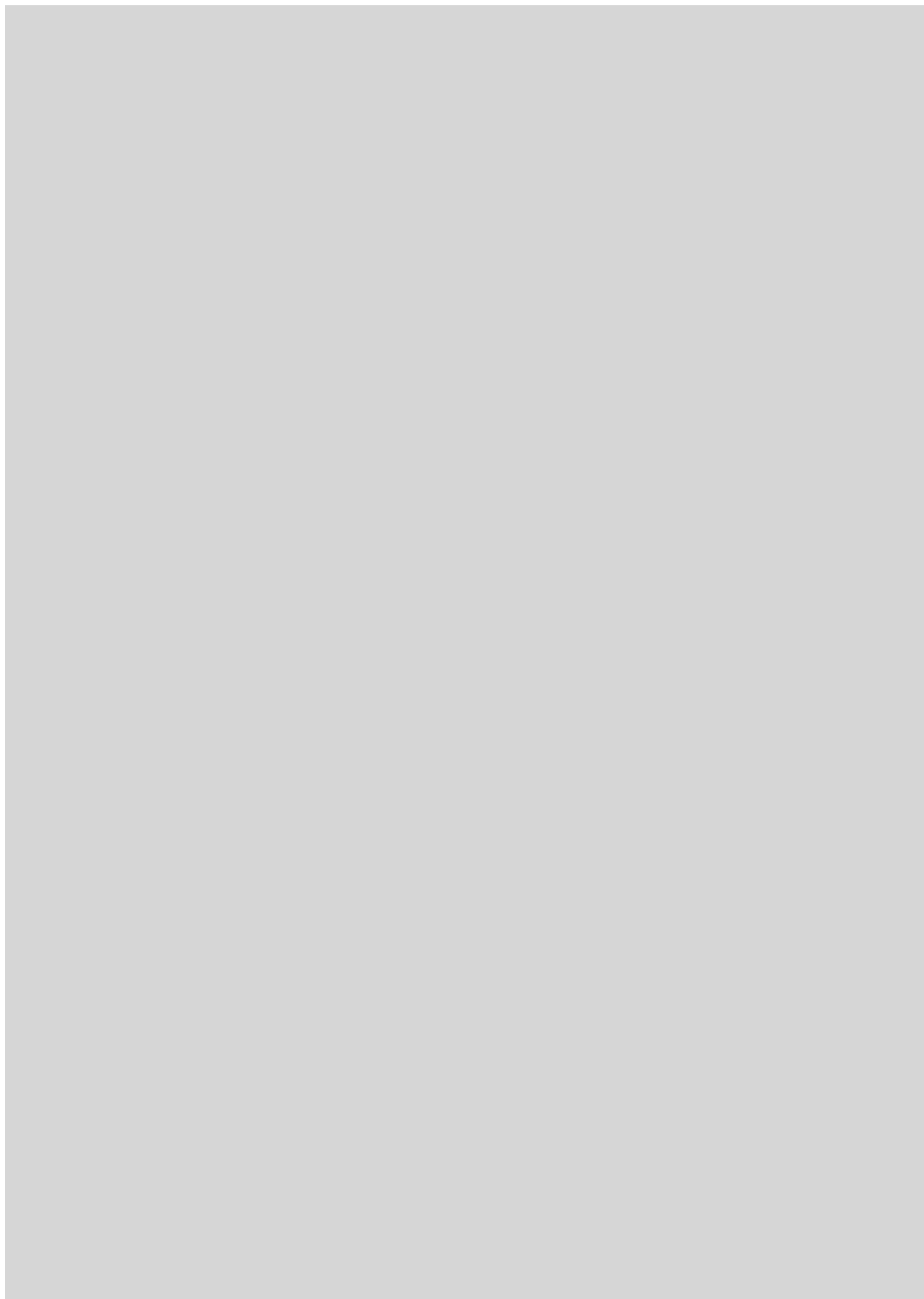
Bibliografía complementaria

B CHROMOSOMES IN PLANTS: ESCAPEES FROM THE A CHROMOSOME GENOME? R. N. Jones A. Houben en *Trends in Plant Science*, vol. 8, págs. 417-423; 2003.

B CHROMOSOMES IN THE EUKARYOTE GENOME. J. P. M. Camacho. Karger; Basilea, 2004.

B CHROMOSOMES. J. P. M. Camacho en *The Evolution of the Genome*, dirigido por T. R. Gregory. Elsevier Inc.; San Diego, 2005.

GENES IN CONFLICT: THE BIOLOGY OF SELFISH GENETIC ELEMENTS. A. Burt y R. Trivers. Harvard University Press; Cambridge, 2006.



La revolución de Galileo y la transformación de la ciencia

El giro intelectual de principios del siglo XVII que marcó el comienzo de la ciencia moderna, en particular de la astronomía, se halla inseparablemente ligado al nombre de Galileo Galilei. ¿Cómo se llegó a ese cambio radical? ¿Qué función desempeñó Galileo?

Jürgen Renn

Hace unos cuatrocientos años, Galileo dirigió el telescopio al cielo y desencadenó una revolución en la astronomía. Vio lo que ningún ojo había descubierto antes: montañas y cráteres en la Luna, los satélites mayores de Júpiter y las estrellas de la Vía Láctea. Lo que vio, lo adujo como testimonio a favor de la concepción copernicana del mundo, y con la publicación de su *Sidereus Nuncius* (Mensajero sidéreo) polemizó abiertamente con la visión oficial de la Iglesia.

Pero Galileo no sólo le ofreció nuevas perspectivas a la ciencia de su tiempo, sino también a la moderna historia de la ciencia. En el siglo XIX se le tenía sobre todo por el creador del método experimental; luego, según el historiador de la ciencia Alexandre Koyré, si fundó las ciencias naturales matematizadas fue porque seguía la filosofía platónica; y la bibliografía reciente insiste en los contextos extracientíficos y presupuestos de su actividad, y estudia con detalle a Galileo como hereje, cortesano o artista. Todas estas interpretaciones coinciden en que Galileo fue un protagonista más o menos singular, e intentan identificar los rasgos que le permitieron dar el paso de la Edad Media a la Edad Moderna de la ciencia. En último término, directa o indirectamente, explican la brusca transformación de la visión científica que se asocia a su nombre por su genio excepcional.

El cambio radical de 1609

El año 2009 ha sido declarado el año de la astronomía: hace cuatrocientos años Galileo realizó las primeras observaciones del cielo con telescopios, y con la publicación de la *Astronomia Nova* de Johannes Kepler se inició la mecánica celeste.

Un problema para la historia de la ciencia

Lo sorprendente es que todas estas interpretaciones de la revolución de Galileo tienen, en cierto sentido, su justificación. Así, sus manuscritos póstumos, conservados en Florencia, prueban que realmente hizo experimentos refinados. Tampoco podemos dudar (después del excelente libro de Horst Bredekamp) de su naturaleza y capacidad artísticas.

Comenzaremos por recapitular algunos puntos de inflexión de la biografía de Galileo para mostrar que su vida se caracterizó por los cambios de estilo científico. Resulta demasiado simple que se quiera relacionar sus logros científicos con uno de estos estilos en exclusiva. La diversidad de sus intereses y actividades y lo variopinto de su biografía apuntan más bien a un proceso general de transformación científica, que no se



1. GALILEO GALILEI (1564-1642) con unos setenta años de edad. El retrato, realizado por Justus Sustermans en el año 1636, se halla en los *Uffici* de Florencia.

deja reducir a unos cuantos descubrimientos de personalidades sobresalientes, aunque parezcan tan singulares como los que Galileo efectuó con el telescopio, que iniciaron la era de la astronomía óptica. La época de la revolución científica que va unida a su nombre es también una época de descubrimientos paralelos, un indicio más de que se operaba un proceso general de transformación científica.

Para seguir la pista de este proceso, merece la pena, en primer lugar, echar una ojeada al saber compartido de aquel tiempo, es decir, el saber que los contemporáneos consideraban herencia común de su historia, el que establecía el horizonte de su pensamiento. Integraban este acervo común, junto al saber intuitivo sobre nuestro entorno, compartido por todos, los conocimientos prácticos de la época —por ejemplo, el que se transmitía en las tradiciones de los oficios— y el saber teórico, que había experimentado en el Renacimiento un nuevo auge gracias al redescubrimiento de los escritos de la Antigüedad.

Pero la dinámica del desarrollo científico que caracterizó a la época de Galileo sólo puede entenderse si se toma también en cuenta que esos saberes desempeñaban una función decisiva en las exigencias técnicas de aquel tiempo. Ya en la Edad Media había surgido en las ciudades europeas un estrato de ingenieros-científicos y artistas que participaban en grandes proyectos técnicos (la construcción de catedrales, fortificaciones, barcos, acueductos y artillerías). Para ellos, era de la mayor importancia la aplicación y ulterior desarrollo de ese patrimonio común de conocimientos, cuya fuente seguían siendo las individualidades (*véase la figura 2*).

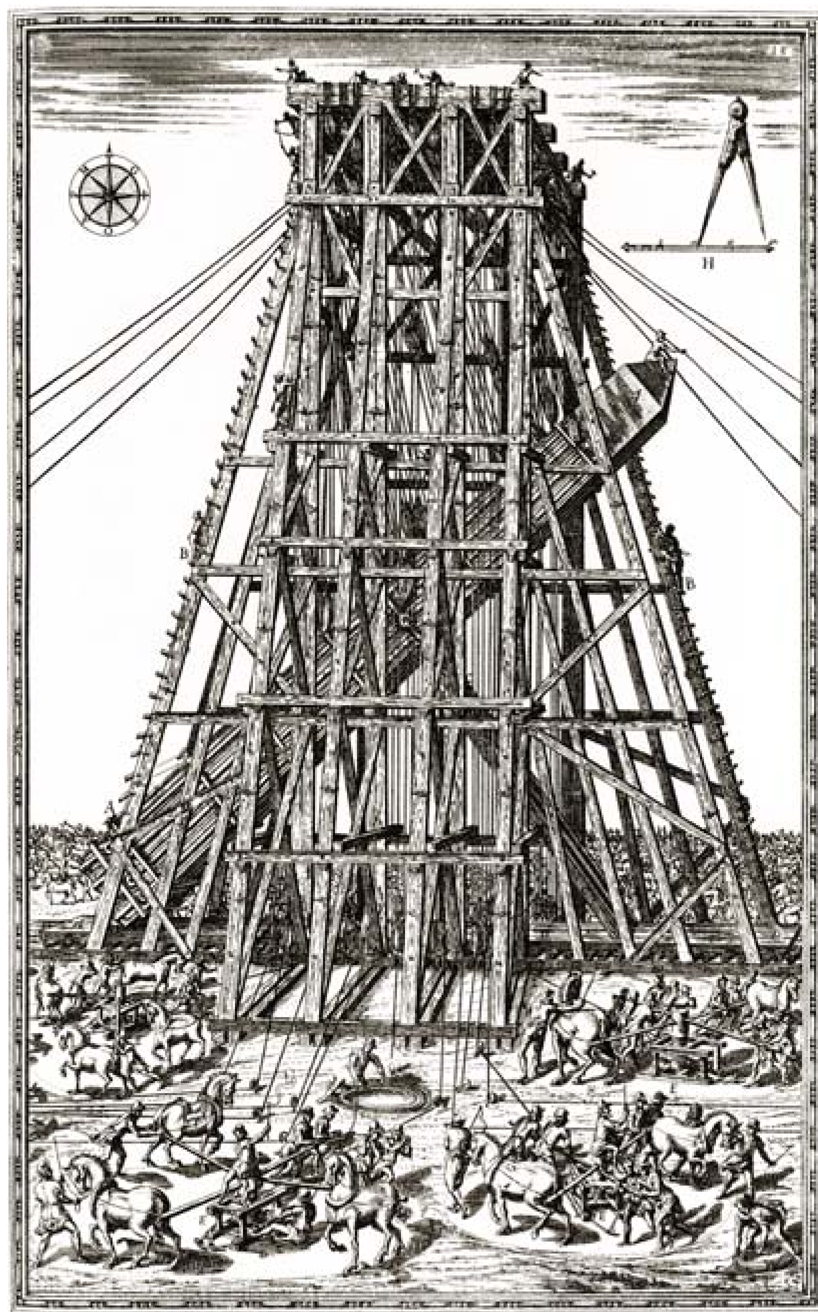
El desarrollo ulterior del saber heredado vino condicionado, a su vez, por la cultura material, en particular por los "objetos-problema" con los que habían de vérselas estos sabios-ingenieros, de las palancas a los proyectiles y su trayectoria, pasando por péndulos y resortes. Los intentos por dominar, con los limitados medios intelectuales de la época, la complejidad de tales objetos-problema fueron precisamente los desencadenantes de esa transformación del saber de la que surgirían la mecánica clásica, a partir de los últimos coletazos de la filosofía natural aristotélica, y la astronomía moderna, a partir de la imagen geocéntrica del mundo heredada de la Antigüedad.

Una personalidad poliédrica

Galileo inició su carrera profesional como matemático. En 1589, con 25 años, accedió a la cátedra de matemáticas de la Universidad de Pisa. Por su intercambio epistolar con eminentes sabios, entre ellos el jesuita y matemático Christophorus Clavius y el científico e ingeniero Guidobaldo del Monte, sabemos que Galileo se distinguió primero por sus estudios matemáticos de mecánica en la tradición de Arquímedes. Su ingenio en la aplicación de la técnica euclídea de la demostración y su soberano dominio de los problemas de estática planteados por Arquímedes le habían otorgado el reconocimiento y crédito de este experto en su campo, sin que ello le hiciera avanzar un ápice en las aún inseguras relaciones institucionales científicas de la época.

A decir verdad, Galileo debería haber sido médico, según el deseo de su padre. Esa carrera profesional resultaba mucho más lucrativa que

2. EN TODA EUROPA, LOS GRANDES PROYECTOS TECNICOS fomentaron la aparición de los ingenieros-científicos e impulsaron la transformación científica. El ejemplo que ofrece esta figura es la erección, en 1586, del obelisco del Vaticano, en la actual plaza de San Pedro de Roma, mediante el procedimiento ideado por el arquitecto Domenico Fontana.



UFFICI, FLORENCIA (*retrato de Galileo*); DOMENICO FONTANA, ROMA 1590 (*Obelisco*)/*Sterne und Weltraum*



3. EN SU CUADERNO DE NOTAS "Meditatiunculae", Guidobaldo del Monte anotó en 1592 los resultados de un experimento sobre los lanzamientos que probablemente realizó con Galileo, cuando éste le visitó ese año.

BIBLIOTECA NACIONAL DE PARIS, MS. CAT. Nº LAT. 10246/*Sterne und Weltraum*

las matemáticas. Vincenzo, su progenitor, era músico y había publicado una obra importante de teoría musical. Parece que gracias a su padre el joven Galileo vio muy pronto las posibilidades cognitivas que ofrecía la incorporación de cálculos matemáticos y técnicas experimentales en un campo del saber práctico. De ahí quizá su sensibilidad a la fascinación de las clases que daba Ostilio Ricci en la *Accademia del Disegno* de Florencia. Es probable que Ricci fuera discípulo del famoso ingeniero-científico y creador de la balística científica Niccolò Tartaglia; aunque enseñaba —basándose en las obras de éste— geometría euclídea (en realidad, técnicas prácticas de cálculo siguiendo la tradición de Luca Pacioli), impartía también perspectiva y técnicas de dibujo, necesarias para los arquitectos y los ingenieros-artistas. En todo caso, es obvio que esta enseñanza indujo a Galileo a abandonar los estudios de medicina y dedicarse de pleno a las matemáticas y a la mecánica.

Sin embargo, después de haber tomado posesión de su cátedra de Pisa en 1589, Galileo cambió su perfil científico. Probablemente bajo la influencia de los estudios científicos de sus colegas pisanos Borro y Buonamici, redactó el escrito filosófico sobre el movimiento al que en la bibliografía se conoce con el título de *De motu*. En las diversas versiones de este escrito temprano, inédito, se ocupaba de temas aristotélicos tales como el movimiento de los graves (los cuerpos que caen) en medios diferentes, pero trataba también de máquinas sencillas, como la balanza y el plano inclinado. Sin embargo, a pesar de la polémica antiaristotélica, la física aristotélica y las diferencias entre el movimiento natural y el violento seguían constituyendo la base de sus reflexiones. Frente a la tradición escolástica, la obra de Galileo, por una parte se remite a la mecánica y, por otra, intenta valerse de las ideas y teorías de Arquímedes para una revisión de la física aristotélica. Así, Galileo sustituyó el aserto aristotélico de que los cuerpos caen tanto más deprisa cuanto más pesados son por la tesis inspirada en Arquímedes de que la velocidad de caída depende del peso específico. Los objetos-problema de la técnica de la época, como el péndulo y el movimiento de los proyectiles, desempeñan en el tratado de Galileo una función, si bien secundaria.

Experimentos de balística

El año 1592 marca otro punto de inflexión en la carrera de Galileo, a la vez que sella el inicio de un nuevo estilo científico. Galileo logró, con el apoyo de su protector Guidobaldo del Monte, que se le llamase a la cátedra de matemáticas de la famosa Universidad de Padua, mucho mejor pagada que la de Pisa. En su viaje a la república veneciana, Galileo aprovechó la oportunidad de visitar a Guidobaldo en su palacio de Mombaroccio (cerca de Pesaro) y disertar con él sobre intereses científicos comunes.

Algunas anotaciones en el cuaderno de estudios de Guidobaldo, que hoy se guarda en la Biblioteca Nacional de París, atestiguan este intercambio y los temas abordados (*véanse las figura 3 y 8*); entre ellos, el equilibrio en el plano inclinado, la oscilación de cuerdas, la forma geométrica de una cadena oscilante y la curva que describe un proyectil. Probablemente se ocuparan también de la obra de Giambattista Benedetti. Había éste tratado en su libro, algunos años antes que Galileo, problemas similares a los planteados por Galileo en su *De Motu*, por ejemplo el movimiento de los graves en distintos medios. Guidobaldo era escéptico ante tales trabajos, pues, en su opinión, no se podían realizar con un rigor parejo al que Arquímedes había establecido en la estática.

No obstante, Guidobaldo y Galileo realizaron juntos un experimento sobre el movimiento de proyectiles. Aunque no puede decirse

que arrojara un resultado concluyente, acabaría constituyendo la base de una nueva teoría del movimiento. Le dieron una capa de tinta a una esfera y la dejaron caer oblicuamente por un plano inclinado. El rastro que dejaba, como Guidobaldo anotó en su cuaderno, se parecía a una parábola o a una hipérbola, y ante todo a una catenaria invertida (*véase la figura 3*).

¿Qué conclusiones había que sacar de ahí? Aunque la forma geométrica exacta de la trayectoria no se estableciese con precisión mediante este experimento, era patente que quedaba contradicha la opinión extendida, según la cual la trayectoria de un proyectil debía ser asimétrica. Según esta suposición procedente de la dinámica aristotélica y que se puede encontrar en numerosos tratados de la época sobre artillería (para empezar en la famosa *Nova Scientia* de Tartaglia), un proyectil se mueve al principio con un movimiento "violento" (es decir, contra su naturaleza) hacia arriba en línea más o menos recta hasta que, poco a poco, su peso se impone, de forma que finalmente desciende con un movimiento "natural" rectilíneo hacia su lugar "natural", el centro de la Tierra.

La curva, más o menos simétrica, que había mostrado el experimento de Guidobaldo y Galileo, era difícilmente compatible con esta opinión, pero tampoco servía para fundamentar un rechazo completo del esquema mental aristotélico. La similitud de la trayectoria del proyectil con la catenaria parecía sugerir que en ambos casos la tendencia natural de los cuerpos pesados a caer hacia abajo y la fuerza "violenta" que se oponía a esa tendencia cooperaban, desde un principio, para que se originase una curva simétrica. Otras consideraciones, que se basaban en el caso especial de un lanzamiento horizontal, hacían verosímil que, si se adoptaba la hipótesis de la simetría, respaldada por la semejanza con la catenaria, la trayectoria de un proyectil fuese una parábola —en vez de una hipérbola—, aunque el experimento no pudiese, claro está, ofrecer ninguna información exacta.

En cualquier caso, al menos se había podido pensar en analizar matemáticamente la trayectoria del movimiento de los proyectiles y las tendencias del movimiento que la constituyen. A partir de la verosímil hipótesis de su forma parabólica, se había podido determinar la ley de la caída de los cuerpos, es decir, la relación cuadrática entre los espacios y los tiempos en la caída libre. A la vista del desarrollo posterior, esta conclusión fue un giro que acabó llevando a una concepción clave de la mecánica clásica. Pero, ¿qué significaba para el propio Galileo?



4. GALILEO dibujó estas parábolas de tiro con ayuda de catenarias imitadas.

La aplicación práctica

Del encuentro con Guidobaldo del Monte en el año 1592 se deriva un nuevo estilo científico de Galileo, pero no precisamente el que se podría esperar desde la perspectiva actual. Como atestigua un manuscrito de la época, el examen de la estructura matemática de la trayectoria no se convirtió en el punto de arranque de un tratado científico sobre el movimiento, sino en un componente, quizá ni siquiera central, de un tratado de artillería que Galileo tenía pensado escribir. La visita a Guidobaldo le supuso un punto de inflexión: el filósofo se convirtió en ingeniero-científico, para quien los problemas técnicos y prácticos son lo más importante.

Al parecer impresionado por el amplio abanico de las actividades de Guidobaldo, de su taller y de sus compromisos como constructor de instrumentos, asesor militar e ingeniero, Galileo se procuró en Padua, junto a su trabajo de profesor de universidad, un entorno práctico semejante. También organizó un taller, ofreció clases de temas militares, desarrolló y vendió instrumentos, como su famoso círculo proporcional, proyectó estudios sobre artillería y mecánica, todo según el modelo de Guidobaldo del Monte (*véase la figura 4*).

Este giro práctico de los intereses científicos de Galileo tuvo lugar en la vecindad al arsenal veneciano, uno de los "complejos militares industriales" más importantes del mundo occidental. En su obra tardía sobre mecánica, los *Discorsi,* publicados en 1638, dedicaría un reconocimiento literario a los ingenieros del arsenal, a cuya experiencia práctica agradecería las intuiciones clave de su ciencia.

Una ciencia del movimiento

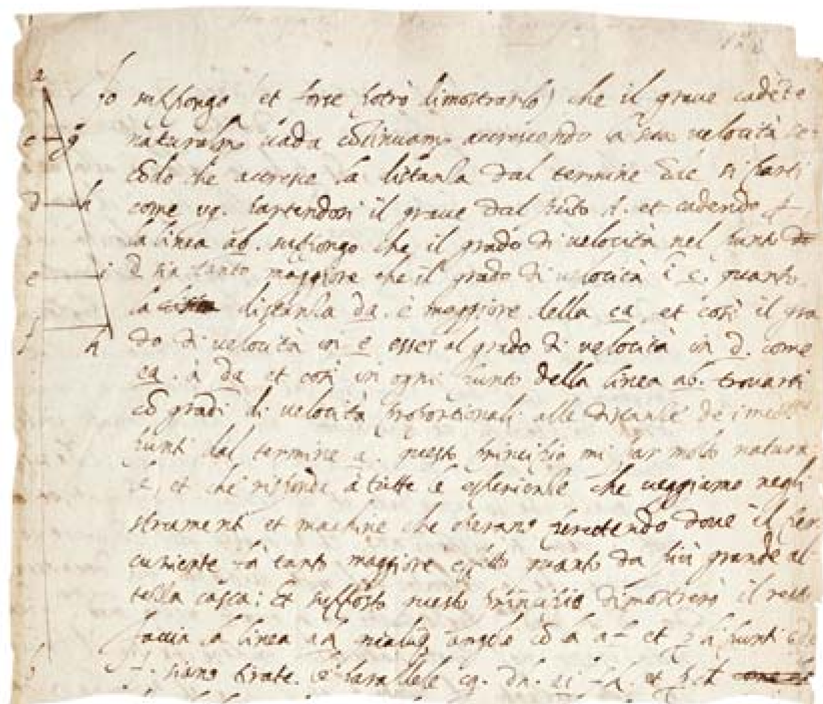
Pero durante su estancia en la república veneciana, entre 1592 y 1610, tuvo lugar otro giro en el perfil científico de Galileo. Entre múltiples propuestas y discusiones científicas y de filosofía natural, como las que mantuvo con Paolo Sarpi, eminente intelectual veneciano, empezaron a condensarse en una red

de conclusiones interdependientes las ideas, al principio más o menos aisladas, de Galileo concernientes a las propiedades del movimiento de complejos mecánicos (el péndulo, el plano inclinado, el movimiento de los proyectiles y la caída de los cuerpos).

Paulatinamente surgió la posibilidad, a partir de esa urdimbre de conclusiones, de desarrollar una teoría, más aún, una nueva ciencia del movimiento. Un punto de partida importante lo constituyó la comprensión conceptual del movimiento acelerado con ayuda de los instrumentos desarrollados en la escolástica medieval para describir los procesos de cambio. Entre ellos se encontraban los diagramas, que había utilizado Nicolás de Oresme en el siglo XIV, para representar la relación entre un proceso global y los cambios momentáneos que lo constituían (*véase la figura 5*). La aplicación de este esquema conceptual al estudio del movimiento constituía en la Edad Media un caso aislado; en manos de Galileo y sus contemporáneos se convirtió, en cambio, en un instrumento central del análisis del movimiento acelerado y en punto de partida del posterior cálculo diferencial e integral.

Como documentan numerosos esbozos y anotaciones de la época, Galileo trató de relacionar las regularidades que conocía del movimiento pendular, de la caída de los cuerpos y de los proyectiles. Siguiendo el ejemplo de Euclides y Arquímedes, quiso derivarlas deductivamente de unos pocos principios, aún arraigados en los presupuestos conceptuales de la ciencia antigua (por ejemplo, la distinción entre movimiento natural y violento).

5. ANALISIS DE GALILEO del movimiento acelerado.



Las sorpresas y fracasos, las contradicciones y ambigüedades con que tropezó Galileo en tales intentos le impidieron de momento presentar sus resultados en la forma de unas deducciones convincentes, insertas en una nueva ciencia coherente del movimiento. Pero la exploración galileana del marco fijado por la mecánica preclásica conduciría hacia un ulterior desarrollo que acabaría por desbordarlo.

En todo caso, no hay duda alguna de que Galileo, a partir de 1602 más o menos, trabajó intensamente en la elaboración de esa nueva teoría del movimiento. Ni cabe tampoco duda de que en 1604, si no antes, se percató de que tenía en sus manos la llave de una revolución científica. Sus otras ocupaciones (la docencia universitaria y los compromisos con la práctica) iban pasando a segundo plano; más aún, llegaron a ser una carga, de la que se esforzaba por librarse para dedicarse por entero a la elaboración de su nueva teoría.

Bajo las condiciones sociales de la ciencia en la temprana Edad Moderna, momento en que empezaban a constituirse instituciones destinadas a la formación e investigación, no había más que una vía que pudiese conducir a esa liberación: el mecenazgo. Formaba parte del sistema de patronazgo de la época el acrecentamiento de la reputación y gloria del mecenas con trabajos creativos que no fueran posibles sin su protección y ayuda. Este sistema se había desarrollado, desde el Renacimiento, en estrecha conexión con la promoción del arte y la arquitectura, de modo que los artistas, alternando las funciones de pintor, arquitecto, ingeniero, asesor técnico y cortesano, eran sus verdaderos protagonistas. Los científicos como Galileo debían seguir su ejemplo, si querían tener un éxito semejante al de Leonardo o Miguel Angel. Mas para un ingeniero-científico o para un matemático práctico no resultaba fácil incorporarse a estos empleos cortesanos, pues era, sobre todo, la irradiación simbólica de las prestaciones creativas la que daba acceso a las cortes de la época.

El telescopio

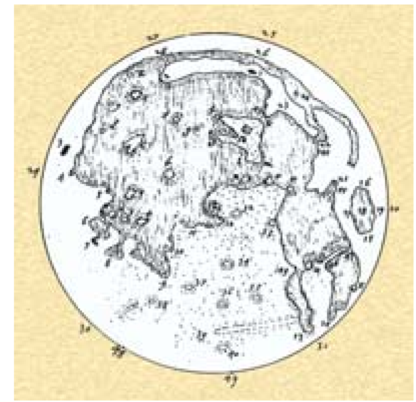
Con la invención del telescopio en 1609, Galileo no sólo encontró una nueva manera de observar el firmamento, sino también las esperanzas de una carrera en las cortes italianas. Así, sus actividades científicas adoptaron otro estilo más. El buen científico-ingeniero, tras las noticias recibidas en la primavera de 1609 de la invención en Holanda del telescopio, recomendaría en primer lugar a la república veneciana el que él mismo había reproducido y mejorado, sobre todo por sus ventajas prácticas y militares. Sin embargo, serían sus descubrimientos astronómicos (las observa-

ciones de la Luna y de las fases de Venus, la descomposición de la Vía Láctea en estrellas separadas y, sobre todo, los cuatro satélites mayores de Júpiter) los que cambiarían de raíz la situación de Galileo.

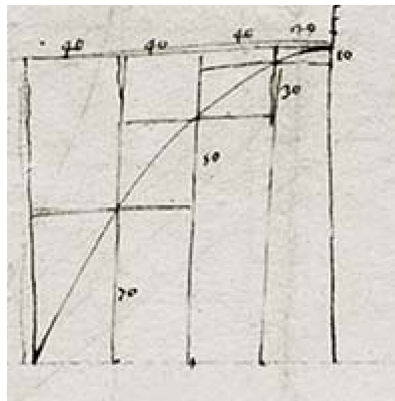
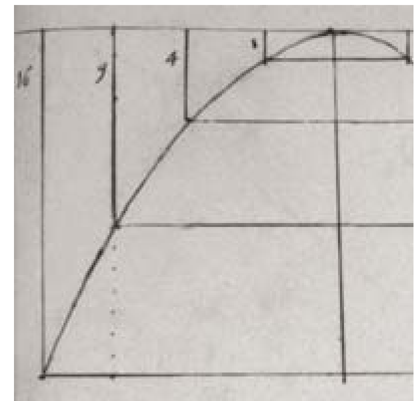
La divulgación sorprendentemente rápida de estos descubrimientos en el *Sidereus Nuncius* (opúsculo memorable aparecido el 12 de marzo de 1610) hizo de Galileo un reconocido astrónomo en toda Europa y bien pronto hasta en China, el más prominente valedor de la imagen copernicana del mundo y un provocador que socavaba la concepción geocéntrica defendida por la Iglesia. La calidad artística de las representaciones gráficas de sus descubrimientos, habida cuenta de su interpretación y el valor que reportaban en el mecenazgo de la época, no fueron la menor de las razones de que Galileo se convirtiera en el paralelo científico de Miguel Angel y en el filósofo cortesano de los Medici de Florencia. No es, pues, tampoco una casualidad que su discípulo Viviani creara el mito de que la fecha de nacimiento de Galileo coincidía con la fecha de la muerte de Miguel Angel. (En realidad, Galileo nació en Pisa el 15 de febrero de 1564, tres días antes de la muerte de Miguel Angel en Roma.)

Galileo dedicó los satélites de Júpiter, por él descubiertos, a los Medici como si fueran una obra de arte que hubiese hecho; se presentaba a sí mismo como un nuevo Adán, al que Dios había permitido vislumbrar una dimensión de la Creación hasta entonces oculta. Esto le parecía, al igual que a los grandes artistas de su tiempo, que le daba derecho a una interpretación de esa creación desde su propia perspectiva. Para Galileo, tal derecho consistía no sólo en que la lectura del libro de la naturaleza escrito en lenguaje matemático se hiciera al margen de la Biblia, sino también en escrutar la imagen del mundo de la filosofía natural aristotélica, que la Iglesia hacía suya, y donde fuere necesario, corregirla, en especial en la cuestión del geocentrismo. Sus importantes obras de filosofía natural, el *Saggiatore* (Ensayador), de 1623, y el "Diálogo sobre los dos máximos sistemas del Mundo", de 1632, no estaban, pues, destinadas sólo a un reducido círculo académico; tenían también este objetivo más amplio.

Del Galileo capaz de representar sugerentemente sus descubrimientos como actos de visión creativa gracias a sus dotes gráficas y a su formación artística en la *Accademia del Disegno*, se llega por una vía directa al Galileo cortesano y filósofo de corte de los Medici, cuya ambición no se arredraba ante la reforma de la visión del mundo de la Iglesia católica, y desde allí al Galileo presuntamente hereje

6. SORPRENDENTE PARALELISMO de logros científicos: dibujo de la Luna, de Galileo (*izquierda*), y el mapa de la Luna de Harriot (*derecha*), ambos de alrededor de 1610.

7. ... Y DE ESTUDIOS SOBRE EL MOVIMIENTO EN EL AIRE de cuerpos lanzados, en los manuscritos de Galileo (*izquierda*) y de Harriot (*derecha*).

y al Galileo mártir de la ciencia, condenado por la Inquisición y obligado a abjurar del copernicanismo, que debió pagar el fracaso de la reforma con el recorte de sus investigaciones en aquello que afectase a la manera de ver el mundo y con el arresto domiciliario. Esa limitación le llevó a volver a dedicarse, durante su arresto domiciliario en Arcetri (cerca de Florencia), a la teoría del movimiento y a proseguir su trabajo iniciado en Padua sobre el perfeccionamiento de la mecánica antigua. En 1638 concluyó estos trabajos con la publicación de los *Discorsi* dedicados a dos nuevas ciencias, iniciadas y cimentadas por Galileo: la teoría de la consistencia de la materia y la teoría del movimiento.

El saber compartido de la mecánica preclásica

El destino, lleno de vicisitudes, de Galileo pone de manifiesto que ni un estilo determinado ni un método concreto fueron decisivos para su éxito científico, sino su habilidad para sacar partido de las posibilidades de pensamiento y actuación que se le presentaban. Los cambios de su perfil científico apuntan tanto a sus cualidades personales como a las distintas vías

que eran objetivamente posibles en el panorama intelectual y social de la época. Pero está claro que en este recorrido histórico también eran viables otros caminos que podrían haber conducido a resultados equiparables.

Una ilustración contundente de esta posibilidad nos la ofrece el sorprendente paralelismo de los logros científicos del ingeniero-científico inglés Thomas Harriot, al que se puede considerar, con justicia, el "Galileo inglés" (*véanse las figuras 6 y 7*). Casi al mismo tiempo que Galileo, y con independencia de él, apuntó un telescopio al cielo y realizó experimentos y cálculos sobre el movimiento de la caída de los cuerpos y el de los proyectiles. Dio con la ley de la caída de los cuerpos, luchó igual que Galileo por su derivación con ayuda de los métodos medievales a partir de las características del movimiento acelerado y dibujó uno de los primeros mapas detallados de la Luna.

Pero, a diferencia de Galileo, Harriot no dejó publicaciones relevantes de sus descubrimientos, sino tan sólo miles de manuscritos con anotaciones y esbozos. Su carrera profesional, en la Inglaterra anglicana y monárquica, discurrió de muy distinta manera de la andada por Galileo en la Italia católica, con sus muchos estados, grandes y pequeños. Aunque no estaba sujeto a la intervención de la Inquisición, las posibilidades de Harriot de publicar en Inglaterra eran más reducidas que las de Galileo en Italia. Quien utilice las manifiestas diferencias entre Harriot y Galileo con el propósito de encontrar la razón del superior éxito de Galileo en las cualidades personales, prescindirá de las muy prometedoras posibilidades de establecer una analogía entre ambos en lo que se refiere al saber que tenían en común, el saber que posibilitó el camino del uno y el del otro.

Como se puede mostrar en el caso de la mecánica, formaba parte de este depósito común un saber intuitivo, práctico y teórico que se había transmitido desde la Antigüedad a la experiencia cotidiana, las tradiciones artesanas y la técnica. Traductores y editores, como Federico Commandino, que ligaron la tradición del humanismo con los intereses de los ingenieros-científicos, habían vuelto a hacer accesibles los escritos de los autores



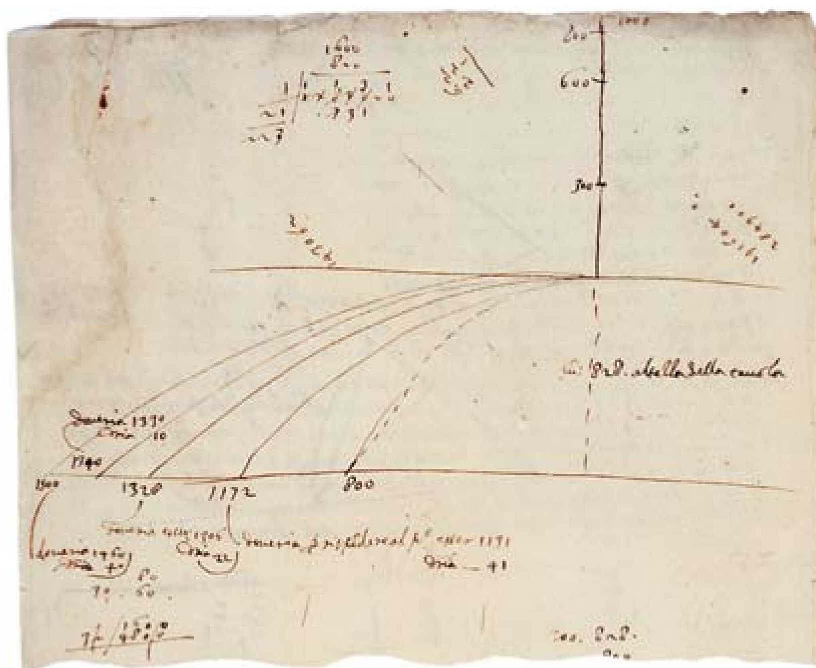
8. "MEDITATIUNCULAE" de Guidobaldo del Monte, 1592, con anotaciones de la palanca acodada.

antiguos, como Euclides y Arquímedes, sobre matemáticas y mecánica. Un punto común de partida del saber teórico fueron las *Cuestiones mecánicas* atribuidas a Aristóteles, en las que el efecto ahorrador de fuerza de diversos instrumentos mecánicos se explicaba reduciéndolos a la palanca.

Otro punto de partida para tratar de explicar la técnica mecánica con ayuda de principios sencillos fue reducir las máquinas algo más complejas a una serie de máquinas sencillas; procedimiento que Zenón de Alejandría, probablemente en el siglo primero después de Cristo, fue el primero en emplear y que había sido transmitido a la incipiente Edad Moderna por un comentario de Pappus (siglo IV d.C.) sobre Herón. La idea de reducir las máquinas complejas a las sencillas estaba en el centro del libro de referencia sobre mecánica publicado a finales del siglo XVI por el mentor de Galileo, Guidobaldo del Monte.

El saber compartido sobre mecánica al comienzo de los tiempos modernos, herencia de la Antigüedad y de la Edad Media, no era en absoluto homogéneo en sus estructuras conceptuales. Había, pues, hueco para puntos de vista divergentes y controversias en las que se seguía tanteando y desarrollando el potencial que ese saber tenía de evolucionar. Por ejemplo, mientras que Guidobaldo centraba su análisis teórico en el concepto de Arquímedes de centro de gravedad, sus contemporáneos Niccolò Tartaglia y Giovanni Battista Benedetti se basaban en el de peso posicional, que se remonta al matemático medieval Jordanus Nemorarius. Esta noción permitía comprender el efecto diferenciado de un peso según fuera su posición, como en una palanca acodada o en un plano inclinado, temas en los que Guidobaldo topó con dificultades (*véase la figura 8*).

Ante un fondo conceptual tan heterogéneo, llegaron estos autores, en parte, a resultados distintos en cuestiones fundamentales de la mecánica. Anotaciones manuscritas de Guidobaldo en un ejemplar suyo, descubierto hace poco, del libro de mecánica de Benedetti muestran lo difícil que parecía ser la comprensión recíproca en un campo que en aquella época estaba en la frontera del desarrollo científico. Sólo gracias a la elaboración de las consecuencias de los distintos sistemas conceptuales y el intercambio intenso en una malla de sabios de toda Europa surgieron, al fin, a partir de los recursos conocidos de la física preclásica, los conceptos fundamentales de la mecánica clásica. La mecánica de Galileo, y en especial sus estudios en torno al movimiento en el plano inclinado, serían tan impensables sin la premisa de este saber compartido como sus logros astronómicos, que se fundan, asimismo, en tradiciones teóricas y prácticas que se remontan hasta la Antigüedad.



9. ANOTACIONES DE GALILEO de un experimento, en el que se dispara horizontalmente una bala a diferentes velocidades y cae libremente. Galileo compara los alcances medidos con los que había calculado.

BNCF, MS. GAL. 72, FOLIO 116v/*Sterne und Weltraum*

Objetos-problema

El verdadero catalizador de la transformación de los conocimientos de la física preclásica lo constituyeron los objetos-problema de la praxis técnica de la época. Los científicos-ingenieros se ocupaban de ellos en relación con grandes proyectos arquitectónicos, técnicos o militares, como la construcción de catedrales, la artillería o las fortificaciones. Tales expertos integraron la columna vertebral, en el campo de la mecánica, de la revolución científica de la incipiente Edad Moderna. Crearon no sólo las nociones fundamentales de la nueva ciencia, sino que activaron también muchos de los recursos científicos de que se alimentó esta revolución con el propósito de ejercer un control intelectual sobre los objetos-problema.

Así, se reunieron tradiciones científicas que hasta entonces se habían transmitido separadas unas de otras, como el saber práctico acerca de la construcción de naves y el teórico sobre las máquinas sencillas. La mayoría de las veces, la exigencia intelectual de problemas como la seguridad de una cúpula, la distribución óptima de los remos o la forma de una cadena en suspenso sobrepasaba las posibilidades de la época. Pero el desafío a los medios científicos disponibles que representaban constituyó para los ingenieros-científicos un motor de su exploración del potencial intelectual oculto en los recursos de conocimiento de que disponían. En última instancia, condujo hasta las concepciones básicas de la física clásica posterior, por más que éstas no siempre satis-

El autor

Jürgen Renn es director en el Instituto Max Planck de historia de la ciencia de Berlín. Investiga preferentemente las revoluciones científicas ligadas a los nombres de Galileo Galilei y Albert Einstein.

ficiesen las expectativas originales, aún presas en las representaciones conceptuales de la física preclásica.

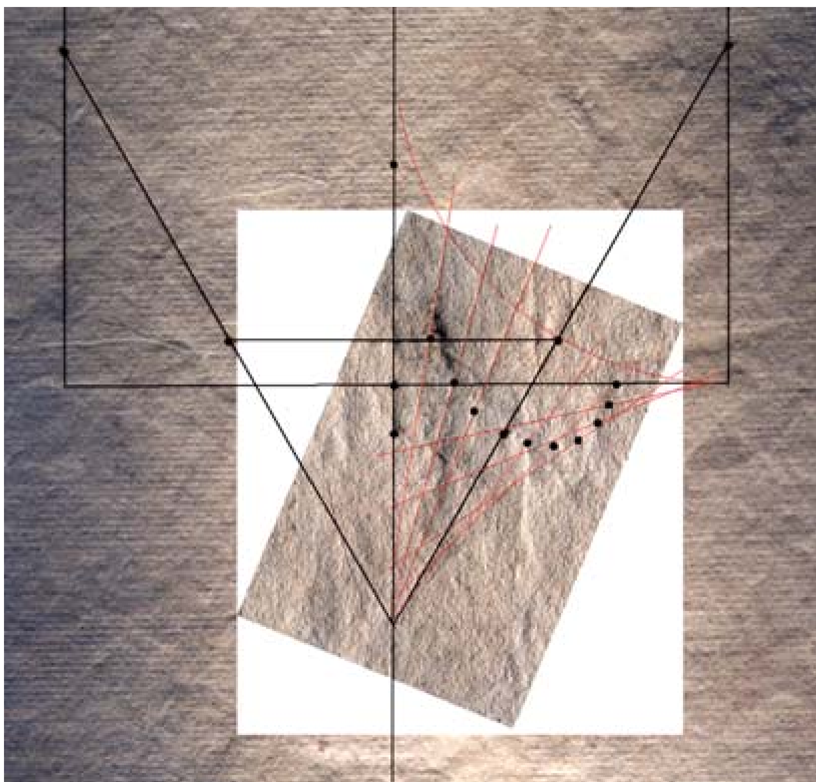
La gratitud que Galileo sintió hacia los expertos técnicos del arsenal veneciano y expresó en sus *Discorsi* tenía su verdadero fundamento en su análisis de uno de esos objetos-problema. A través de un alto funcionario del arsenal, supo enseguida de los problemas de estabilidad y equilibrio que planteaba la construcción de naves cada vez mayores, motivada por un armamento de volumen y alcance crecientes.

Problemas similares eran también conocidos en arquitectura y en ingeniería mecánica. Partiendo de las *Cuestiones mecánicas* de Aristóteles, intentó comprender, con ayuda de la ley de la palanca, el problema de la resistencia a la rotura de un cuerpo. Así, un problema práctico de la ingeniería de la época se convirtió en el punto de partida de una de las dos nuevas ciencias que Galileo adelantó en sus *Discorsi*: la teoría de la consistencia de la materia.

También la segunda nueva ciencia de Galileo (la teoría del movimiento) tuvo su origen en el análisis de uno de los problemas prácticos de la época, la balística (*véanse las figuras 3 y 9*). El propio Galileo enmarcó en un principio en contextos prácticos las ideas acerca de las trayectorias que derivó del experimento que hizo con Guidobaldo. Además, los conocimientos experimentales de los artilleros contemporáneos ofrecían un punto de partida para el desarrollo de una teoría del movimiento de los proyectiles: por ejemplo, lo que sabían sobre la dependencia del alcance del tiro de la velocidad inicial y del ángulo de tiro, así como del ángulo para el que el alcance de tiro es máximo.

No es, pues, sorprendente que sobre esta base empírica, junto con consideraciones dinámicas sobre el comportamiento de las componentes "violentas" y "naturales" del movimiento, no sólo Galileo, sino también otros científicos-ingenieros, como Thomas Harriot, fueran capaces de ocuparse con éxito de una tal teoría. Galileo se guió hasta el final, es decir, hasta la publicación de su teoría en los *Discorsi*, por la sospecha de que la catenaria y la trayectoria de los proyectiles tenían la misma forma, a saber, la parábola. Por esa razón (no sostenible desde el punto de vista actual), no dudaba lo más mínimo, al contrario que la mayoría de sus contemporáneos, de la forma simétrica de la trayectoria de los proyectiles.

Por el contrario, hoy se sabe que la catenaria no es una parábola y —como es típico de los objetos-problema—, está representada por una función para cuya expresión la matemática del tiempo de Galileo aún no estaba preparada. Curiosamente, en los manuscritos de Galileo se hallan ingeniosas tentativas de demostrar la forma parabólica de la catenaria, entre ellas aproximarse a esa forma mediante un hilo con pesos aislados cuya posición de equilibrio Galileo trató de determinar con los procedimientos de Guidobaldo (*véase la figura 10*).



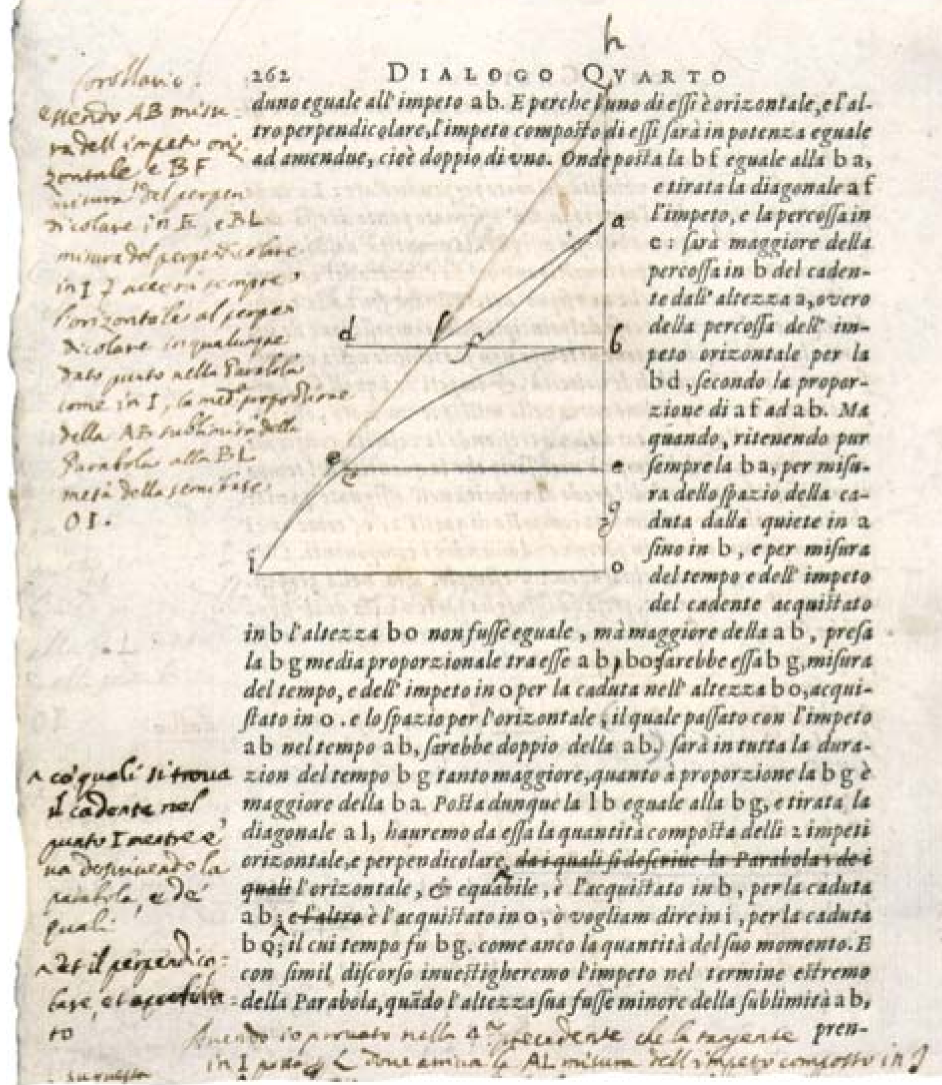
10. CONSTRUCCION DE LA POSICION más baja del centro de gravedad de una cuerda de la que cuelgan tres pesos equidistantes.

FUENTE: MPI FÜR WISSENSCHAFTSGESCHICHTE/*Sterne und Weltraum*

El movimiento de los planetas

La astronomía, en especial el movimiento de los planetas, presentaba también a la ciencia objetos-problema cuya relevancia práctica estaba relacionada con las necesidades de la reforma del calendario y con la navegación. Pero su función como objetos-problema para la ciencia les venía, por una parte, de las tentativas de explicar mecánicamente los movimientos celestes, y, por otra, del contexto ideológico donde tales tentativas se adentraban sin remedio, habida cuenta del modelo del mundo que sostenía la Iglesia.

Galileo intentó muy pronto que sus consideraciones sobre los movimientos de caída y de tiro facilitaran una explicación mecánica del origen del sistema solar. Imaginaba que el Creador dejó caer los planetas desde un punto determinado en dirección al Sol, para desviarlos después en una órbita en la que, finalmente, circundarían el astro con la velocidad adquirida por la caída precedente. Y confiaba en que podría así dar una explicación mecánica de la relación, descubierta por Kepler, entre la velocidad en la órbita y la distancia al Sol.



262 DIALOGO QVARTO

duno eguale all' impeto ab. E perche l'uno di essi è orizontale, e l'altro perpendicolare, l'impeto composto di essi sarà in potenza eguale ad amendue, cioè doppio di uno. Onde posta la bf eguale alla ba, e tirata la diagonale af l'impeto, e la percossa in c: sarà maggiore della percossa in b del cadente dall' altezza a, overo della percossa dell' impeto orizontale per la bd, secondo la proporzione di af ad ab. Ma quando, ritenendo pur sempre la ba, per misura dello spazio della caduta dalla quiete in a fino in b, e per misura del tempo e dell' impeto del cadente acquistato in b l'altezza bo non fusse eguale, mà maggiore della ab, presa la bg media proporzionale tra esse ab, bo sarebbe essa bg, misura del tempo, e dell' impeto in o per la caduta nell' altezza bo, acquistato in o. e lo spazio per l'orizontale, il quale passato con l'impeto ab nel tempo ab, sarebbe doppio della ab, sarà in tutta la durazion del tempo bg tanto maggiore, quanto à proporzione la bg è maggiore della ba. Posta dunque la lb eguale alla bg, e tirata la diagonale al, hauremo da essa la quantità composta delli 2 impeti orizontale, e perpendicolare, ~~da i quali si descriue la Parabola; de i quali~~ l'orizontale, & equabile, è l'acquistato in b, per la caduta ab; ~~e l'altro~~ è l'acquistato in o, ò vogliam dire in i, per la caduta bo; il cui tempo fu bg. come anco la quantità del suo momento. E con simil discorso inuestigheremo l'impeto nel termine estremo della Parabola, quãdo l'altezza sua fusse minore della sublimità ab, pren-

11. LAS ANOTACIONES A MANO de un alumno en su ejemplar de los *Discorsi* (la obra más relevante de Galileo sobre mecánica) contienen indicios tempranos de la ley de inercia.

BNCF, MS. GAL. 79, 1638/*Sterne und Weltraum*

Aunque los cálculos de Galileo, pese a sus esperanzas, no pudieron confirmar el modelo, publicó la idea a modo de extensión verosímil de su teoría del movimiento en la mecánica celeste. De forma análoga, intentó otorgar un significado cosmológico a su análisis del movimiento pendular, convertirlo en puntal de la concepción copernicana e interpretar las variaciones de la pleamar y la bajamar como oscilaciones pendulares dimanantes de los movimientos acelerados de rotación de la Tierra sobre su eje y alrededor del Sol.

La transformación de la ciencia

Las equivocaciones de Galileo (su suposición de que la catenaria es parabólica, su explicación de la cosmogonía por la ley de la caída, su convicción de que las mareas se podían explicar a partir del movimiento copernicano de la Tierra), así como las ideas de sus contemporáneos, muestran cuánto se diferencian el sistema científico de la física preclásica del que caracterizaría a la física clásica. Pero, ¿cómo tuvo lugar el paso de uno al otro? ¿Cómo se llevó a cabo esta revolución científica?

El carácter a largo plazo del desarrollo científico, que es decisivo para la transmisión a través de largos intervalos de tiempo, como el que va de la Antigüedad a la Edad Moderna, y su dependencia de las circunstancias externas, así el despliegue de la cultura urbana, con sus espacios libres y aspiraciones al conocimiento técnico, muestran que quizá no haya ninguna fórmula de general validez para la estructura de las revoluciones científicas.

Con todo, se dejan identificar, a semejanza de lo que ocurre con la evolución de las formas de vida, determinados mecanismos que operan en el desarrollo de la ciencia y hacen comprensible el proceso de transformación. Además, hay que consignar la sorprendente circunstancia de que las grandes irrupciones intelectuales, por ejemplo la del principio de inercia (central para la física clásica), no suceden la mayoría de las veces al comienzo, sino al final del proceso, como resultado de la reestructuración de un sistema de conocimiento muy desarrollado, en vez de por el papel que desempeñen en un nuevo "paradigma", como diría Thomas Kuhn.

El desarrollo ulterior del sistema científico de la física preclásica fue impulsado sobre todo por los problemas con los que se hubieron de enfrentar ingenieros-científicos; Galileo, entre ellos. Tal elaboración condujo —a menudo sobre bases tambaleantes— a resultados (por ejemplo, la trayectoria parabólica de los proyectiles) que llevaron por último a la formulación de conceptos nuevos; ideas inéditas que indicaron el camino hacia la fundamentación convincente de los resultados iniciales.

No es, pues, casual que la ley de inercia aún no entre explícitamente en la argumentación de Galileo de su teoría del movimiento, sino que aparezca, en el mejor de los casos, al margen de sus reflexiones. Sin embargo, para sus discípulos y seguidores resultará evidente que se trataba de su fundamento mismo (*véase la figura 11*).

La transformación de la ciencia representada por Galileo se caracterizó, pues, por un cambio del centro conceptual, una especie de "proceso copernicano". De la misma manera que, con Copérnico, el Sol se convirtió en el centro del movimiento de los planetas, sin que se perdieran por ello los conocimientos técnicos de la astronomía geocéntrica, así también nociones que en un principio ocupaban un lugar marginal en el sistema de la física preclásica pasaron a desempeñar una función esencial en los fundamentos de la física clásica. Esta, a pesar de las diferencias conceptuales que la separaban de su predecesora, se cimentaba en las ideas de Galileo y de sus coetáneos.

Bibliografía complementaria

GALILEO IN CONTEXT. Dirigido por J. Renn. Cambridge University Press, 2001.

GALILEI DER KÜNSTLER. DER MOND. DIE SONNE. DIE HAND. H. Bredekamp. Akademie Verlag; Berlín, 2007.

GALILEI, DER KÜNSTLER. Th. De Padova, J. Staude en *Sterne und Weltraum*, n.º 12, págs. 36-41; 2007.

THE ENGLISH GALILEO: THOMAS HARRIOT'S WORK ON MOTION AS AN EXAMPLE OF PRECLASSICAL MECHANICS. M. Schemmel. Springer, 2008.

Ciencia, filosofía y teología en el proceso a Galileo

Los estudios sobre el proceso han proliferado en los últimos años. ¿Fue en realidad la ciencia el motivo principal de la condena de Galileo?

Rafael A. Martínez

En octubre de 1982 *Investigación y Ciencia* publicó un artículo de Owen Gingerich, titulado "El caso Galileo". Se cumplían 350 años de la publicación del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, que dio origen al proceso a Galileo. La clara exposición de Gingerich podía hacer pensar que el caso estaba definitivamente resuelto. Ha transcurrido más de un cuarto de siglo, y a juzgar por el número de estudios que se siguen publicando, el caso Galileo sigue abierto.

¿Un caso cerrado?

Recuerdo haber leído el artículo de Gingerich en el tren que, tras concluir mis estudios de física en Barcelona, me llevaba a Italia para especializarme en historia y filosofía de la ciencia. No sabía que el Vaticano había creado el año anterior una comisión para el estudio del caso Galileo, propósito sobre el que Gingerich se mostraba escéptico. Diez años más tarde, la comisión se clausuró sin dar lugar, al parecer, a grandes novedades, si se exceptúa un cierto reconocimiento (demasiado tímido, para algunos) de los errores cometidos por las autoridades eclesiásticas.

Sin embargo, el hecho pareció catalizar un nuevo interés por el caso Galileo. Desde entonces los estudios se han multiplicado, poniendo de manifiesto su gran complejidad. Las imágenes reductivas de uno y otro signo, muy frecuentes en los decenios anteriores, resultan hoy poco sostenibles frente a las pruebas documentales y a un examen atento del contexto histórico. Se ha prestado mayor atención a aspectos varios, como sus relaciones con la lógica y la metodología propias del Colegio Romano, con la corte de los Medici y, en general, con la estructura social del mundo barroco, su visión de la Escritura y de la teología, el influjo de corrientes filosóficas que eran entonces objeto de sospechas por parte de la autoridad eclesiástica, su vida personal y familiar. Pero, ¿qué papel desempeñaron en ese complejo entramado de circunstancias la ciencia y la teología? Este es un punto que, sorprendentemente, puede pasar inadvertido.

Una nueva ciencia

Hace 400 años Galileo Galilei (1564-1642), profesor de matemáticas en la Universidad de Padua, dio inicio a la astronomía de observación instrumental. A partir de algunas vagas noticias supo construir un telescopio de gran calidad, con el que comenzó a observar el cielo nocturno. Más importante todavía fue el sentido científico con que supo "leer" sus primeras observaciones astronómicas. En ellas vio una confirmación de la realidad del sistema heliocéntrico propuesto por Nicolás Copérnico en *De revolutionibus orbium cœlestium libri VI* (1543).

Habían transcurrido desde entonces más de 60 años, y el sistema copernicano había sido adoptado como un útil método de cálculo. Las *tablas prutenicas*, elaboradas por Erasmo Reinhold en 1551, habían sustituido las antiguas *tablas alfonsinas*, y habían sido utilizadas para la reforma del calendario establecida por el papa Gregorio XIII en 1582.

Sin embargo, aceptar una interpretación realista del sistema copernicano no resultaba fácil, y no sólo por motivos de orden religioso. Se trataba de aceptar una nueva visión del mundo, en la que el cielo y los astros cambiaban de significado. Los presupuestos conceptuales ligados a la percepción del movimiento eran difíciles de modificar, lo que

CONCEPTOS BASICOS

- Este año se celebra el 400 aniversario de la construcción del primer telescopio de Galileo y de sus primeros descubrimientos astronómicos.
- Leyendo los fenómenos naturales con lenguaje matemático, Galileo dio inicio a una nueva ciencia.
- Galileo consideraba como "punto principalísimo" la movilidad de la Tierra y la estabilidad del Sol.
- El heliocentrismo nunca se declaró "herético", pero alteraba la relación entre las ciencias, desafiando la autoridad de la teología.


1. GALILEO GALILEI (1564-1642).





2. TELESCOPIO construido por Galileo hacia 1610. A la derecha, lente proveniente del telescopio que usó para sus descubrimientos en 1609-1610, enmarcada en ébano y marfil.

INSTITUTO Y MUSEO DE HISTORIA DE LA CIENCIA, FLORENCIA (*arriba*)

era necesario para aceptar el movimiento de la Tierra.

Para la mayoría de los astrónomos la solución era considerar las matemáticas como un instrumento útil de cálculo, y no plantearse problemas "filosóficos". Pocos admitían, como Copérnico, Michael Maestlin y Johannes Kepler, que a través de las relaciones matemáticas podemos descubrir la estructura real del mundo. Pero su actitud se enfrentaba con una seria crítica epistemológica, lo que hoy llamaríamos la "indeterminación de las teorías". Como escribiría el cardenal Belarmino: "no es lo mismo demostrar que suponiendo que el Sol está en el centro y la Tierra en el cielo se salvan las apariencias, y demostrar que en realidad el Sol está en el centro y la Tierra en el cielo".

Galileo compartía esa misma confianza en el valor de las matemáticas, pero iba mucho más allá: para él la Luna, el Sol y los demás astros son "cuerpos", como las piedras o las balas de cañón, o como la Tierra misma. Para conocer la realidad del mundo no sólo podemos recurrir a cálculos astronómicos, sino que podemos también razonar (matemáticamente) a partir de los fenómenos físicos: el aspecto de la Luna, las manchas del Sol, o el movimiento de los cuerpos sobre la Tierra. Galileo comenzaba así a elaborar una nueva ciencia, la *física*.

La condena del copernicanismo (1616)

Galileo fue procesado en 1633, pero ya en 1616 se había visto implicado en otro caso, que tuvo como consecuencia la prohibición del copernicanismo. Cuando publicó sus descubrimientos astronómicos en *Sidereus Nuncius* (1610), Galileo se convirtió en un personaje célebre. Durante un viaje triunfal a Roma, al año siguiente, fue recibido por el Papa y los cardenales, nombrado miembro de la Academia de los Linces y aclamado por el Colegio Romano, la más importante institución académica de los jesuitas. Pero las críticas no se hicieron esperar.

Pronto surgieron voces que acusaban el sistema heliocéntrico de ser incompatible con la Sagrada Escritura. Cuando la discusión alcanzó el palacio ducal, Galileo reaccionó. En carta a Benedetto Castelli, su discípulo y profesor de matemáticas en Pisa, reafirmó la armonía e independencia entre la ciencia y la Biblia. Naturaleza y Escritura proceden de Dios, por lo que no se puede dar ninguna contradicción. Pero la Escritura usa frecuentemente un lenguaje figurado, para ser entendida por todos, por lo que es posible errar al interpretarla. Por eso debemos atender en primer lugar, por medio de la observación y el razonamiento demostrativo, a lo que la naturaleza presenta de modo inexorable, sin pretender imponer una interpretación de la Escritura que más adelante podría demostrarse falsa.

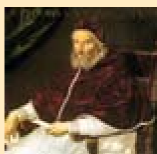
Galileo Galilei: Cronología

1543
Se publica el *De revolutionibus orbium coelestium libri VI* de N. Copérnico. Muere Copérnico

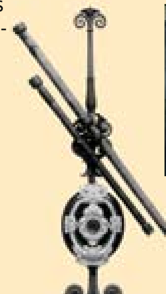


1564
Nace en Pisa Galileo Galilei el 15 de febrero

1582
Reforma del calendario ordenada por Gregorio XIII



1609
Galileo construye sus primeros telescopios y realiza sus primeros descubrimientos astronómicos



1613
Galileo: Carta a Castelli sobre las relaciones entre ciencia y escritura



1616
Los libros copernicanos se incluyen en el *Indice de libros prohibidos*. Se prohíbe a Galileo defender el sistema copernicano



PROHIBICION DEL *DE REVOLUTIONIBUS*

Decreto de la Sagrada Congregación del Indice, 5 de marzo de 1616

"...Y como también ha llegado a conocimiento de la Sagrada Congregación que aquella falsa doctrina pitagórica, completamente contraria a la Sagrada Escritura, acerca de la movilidad de la Tierra y la inmovilidad del Sol, que también es enseñada por Nicolás Copérnico en su obra *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, y por Diego de Zúñiga en su *Comentario sobre Job*, se está divulgando y es aceptada por muchos; como se puede ver en una Carta impresa por un Padre Carmelita, cuyo título es *Carta del Reverendo Padre Maestro Paolo Antonio Foscarini Carmelita, sobre la opinión de los pitagóricos y de Copérnico sobre la movilidad de la tierra y la estabilidad del sol, y el nuevo sistema pitagórico del mundo. En Nápoles, por Lazzaro Scoriggio, 1615*, en la cual dicho Padre intenta mostrar que la dicha doctrina sobre la inmovilidad del Sol en el centro del mundo y la movilidad de la Tierra se adecua a la verdad y no se opone a la Sagrada Escritura; por tanto, para que no se difunda ulteriormente tal opinión en detrimento de la verdad Católica, se ha decretado que las obras mencionadas *Sobre las revoluciones de los orbes* de Nicolás Copérnico, y el *Comentario sobre Job* de Diego de Zúñiga, sean suspendidas, hasta que se corrijan; y que el libro del Padre Paolo Antonio Foscarini Carmelita se prohíba completamente y se condene; y que se prohíban todos los demás libros que enseñan lo mismo: en cuanto el presente Decreto todos respectivamente los prohíbe, condena y suspende."

Galileo quería difundir sus ideas. De la carta se hicieron numerosas copias; la correspondencia desempeñaba entonces el papel que hoy tienen las revistas científicas. Más adelante, la amplió con citas de San Agustín y otros padres, manteniendo la forma de carta, dirigida esta vez a Cristina de Lorena, madre del Gran Duque, que había dado origen a la discusión con Castelli.

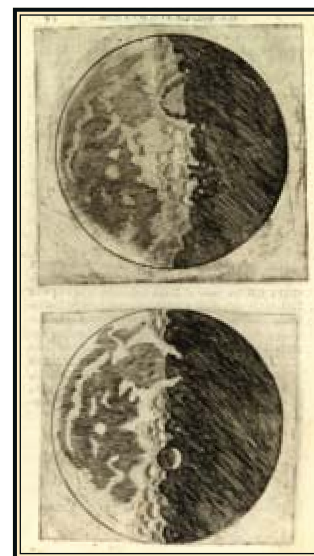
¿Fue una medida útil? Difundió sus ideas sobre la autonomía de la ciencia entre amigos y partidarios, pero el bando contrario se encontró con una nueva arma: no sólo quería modificar la visión tradicional del cosmos, sino que también pretendía dar lecciones de teología. De hecho, la carta fue denunciada a Roma, y aunque no se encontraron en ella errores de peso, puso en marcha la máquina del Santo Oficio.

Galileo no se quedó de brazos cruzados. En diciembre de 1615 se hallaba en Roma dispuesto defender la teoría copernicana. Pero su actividad no iba a dar el resultado que esperaba. Galileo era un maestro de la argumentación polémica, y fácilmente triunfaba en los salones romanos, entre cardenales y aristócratas. Pero, mientras, la cuestión se debatía en un campo distinto.

Galileo deseaba un debate abierto a partir de datos de observación y razonamiento lógico, guiado por lo que hoy llamaríamos método científico. Pero la lógica de las congregaciones vaticanas era distinta. La idea misma de "procedimiento científico" era inexistente: requería aceptar que se trata de un campo en el que los datos empíricos son determinantes. Pero un nuevo sistema del mundo era visto como competencia de filósofos y teólogos, expertos en la filosofía natural de Aristóteles, con la que la teología había elaborado una gran síntesis desde la época de Tomás de Aquino.

Galileo no tuvo ocasión de intervenir en la discusión, que se adentraba cada vez más en terreno teológico. Un opúsculo de Paolo Antonio Foscarini, que buscaba demostrar la compatibilidad del copernicanismo con la Escritura, avivó los temores. La actitud general quedaba clara en la respuesta que Belarmino le envió: había que mantener, desde luego, la separación entre ciencia y Escritura, pero eso significaba que los astrónomos se ocuparan sólo de "hipótesis matemáticas", y

3. *SIDEREUS NUNCIUS* (1610).



1623 — Elección de Urbano VIII. Al año siguiente Galileo obtiene su consentimiento para retomar la cuestión copernicana



1630 — Gestiones de Galileo en Roma para obtener el *imprimatur* para el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*

1632 — Se publica en Florencia el *Diálogo*. Se ordena a Galileo comparecer en Roma ante el Santo Oficio

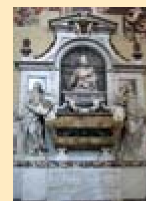


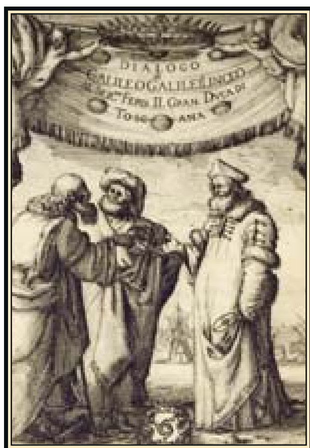
1633 — Proceso, sentencia y abjura de Galileo

1638 — Galileo publica en Holanda los *Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*



1642 — Galileo muere en Florencia el 8 de enero





4. FRONTISPICIO del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* (Florencia, 1632).

no pretendieran extraer conclusiones en el campo natural.

El 19 de febrero de 1616 el Santo Oficio envió a once teólogos calificadores dos proposiciones: "Que el sol es el centro del mundo y, por tanto, inmóvil en cuanto a su posición. Que la Tierra no es el centro de mundo ni inmóvil, sino que se mueve toda ella, también con movimiento diurno." Reunidos el día 24, juzgaron la primera proposición como "estúpida y absurda en filosofía, y formalmente herética"; y la segunda, que compartía el mismo juicio filosófico, "por lo menos errónea en la fe" (una censura inferior a la de herejía).

Fue la primera vez que se afirmaba el carácter herético de la doctrina copernicana; si fue la única es una cuestión debatida. En cualquier caso, se trató del único examen teológico del copernicanismo. Que no medió un estudio profundo resulta evidente: el tiempo a disposición era escaso; ninguno de los teólogos era experto en cuestiones astronómicas o naturales y, además, las dos proposiciones eran claramente insuficientes para resumir la teoría copernicana. Es verdad que el mismo Galileo consideraba como "punto principalísimo" la movilidad de la Tierra y la estabilidad del Sol, pero el sentido era muy distinto.

Para Galileo se trataba de "hechos físicos", que podrían ser demostrados a partir de la experiencia (en primer lugar, de la que él mismo había obtenido a través del telescopio) y del razonamiento lógico-matemático. Para los teólogos del Santo Oficio, eran proposiciones que se referían a realidades que, si bien se apoyaban en la experiencia sensible, sólo podían fundamentarse por medio de un razonamiento filosófico. Además, mientras no hubiera pruebas evidentes, debían ser refutadas también por razones teológicas.

¿Hubiera sido diverso el juicio, si Galileo hubiera ofrecido pruebas concluyentes del movimiento de la Tierra? Así lo aceptaba, en teoría, Belarmino, pero no parece verosímil. La diversa comprensión de lo que significaba conocer la naturaleza hacía casi imposible el diálogo. En mayo de 1615, escribiendo a Piero Dini, Galileo reconocía que sería útil "demostrar con mil pruebas" que la posición de Copérnico es verdadera y la contraria, insostenible. Pero, ¿cómo podría hacerlo, "si estos peripatéticos se muestran incapaces de aceptar incluso las razones más simples y fáciles, y, al contrario, se apoyan con todo empeño en proposiciones que no tienen ninguna eficacia"? La adhesión a distintos "paradigmas" (en términos kuhnianos) hacía imposible el diálogo científico.

5. PALAZZO FIRENZE (Roma). Galileo se alojó en este palacio, residencia del embajador de Toscana en Roma, Francesco Niccolini. Además de hospedar a Galileo con toda atención, Niccolini tuvo un papel importante en las negociaciones con Urbano VIII sobre el proceso a Galileo.



¿Era "herético" el copernicanismo?

A pesar de todo, el copernicanismo no fue declarado herético. No hay que olvidar que la cuestión era ante todo jurídica. El Santo Oficio constituía un tribunal (la *Santa y Romana Inquisición*), cuyos jueces eran los cardenales y cuyo presidente era el Papa. Aunque el tribunal en sí mismo no creaba doctrina, al declararla le imponía fuerza de ley, dando origen tanto a deberes, como a censuras y penas. El juicio de los calificadores carecía de valor mientras que la congregación no lo asumiera, e hiciera pública una declaración, que adquiriría así fuerza de ley. Pero la congregación no lo hizo. Reunida el jueves 25 de febrero bajo la presidencia del papa Pablo V, únicamente determinó que Galileo fuese amonestado, para que abandonase tal opinión, misión que fue encomendada al cardenal Belarmino. El Santo Oficio no publicó ningún decreto al respecto.

Fue en cambio la Congregación del Indice la que actuó públicamente. Creada por Pío V en 1571, se ocupaba del examen de libros sospechosos de herejía y de su inclusión en el *Indice de libros prohibidos*. El primero de marzo, tras seria discusión, se decidió suspender el *De revolutionibus* de Copérnico y el tratado *In Iob* del teólogo Diego de Zúñiga, hasta que se corrigieran, y prohibir el opúsculo de Foscarini. Se prohibían además, en adelante, *omnes libros idem docentes*, todos los libros que enseñaran la misma doctrina. La decisión fue aprobada por el Papa dos días más tarde, y el decreto fue publicado por la Congregación del Indice el 5 de marzo.

El decreto incluía la causa de la decisión, y calificaba la opinión copernicana como "total-

WWW.ASTRONOMY2009.ORG (*arriba*); CORTESIA DEL AUTOR (*abajo*)

mente contraria a la Sagrada Escritura". No se hace referencia a que sea herética o se oponga a la fe; y si no es así, la contradicción con la Escritura podía ser resuelta, por ejemplo, interpretando mejor la Escritura. Esto no significa que se haya querido dejar indeterminada la calificación doctrinal del copernicanismo. Es preciso tener en cuenta el carácter jurídico, no magisterial, del decreto del Indice. A partir de 1616 la lectura sin permiso de libros copernicanos constituía un delito eclesiástico. Pero no se había definido ninguna verdad teológica. Sólo Galileo había recibido una amonestación por la que se le prohibía, al menos, sostener y defender la inmovilidad del Sol y el movimiento de la Tierra.

El proceso a Galileo (1633)

En 1633 muchas cosas habían cambiado. Pablo V y Roberto Belarmino habían fallecido. El papa Urbano VIII, Maffeo Barberini, había reabierto muchas esperanzas. En 1624, poco después de su elección, había dado su consentimiento a una propuesta de Galileo: escribir una obra para mostrar que la cuestión copernicana se conocía perfectamente en Roma, y que la prohibición de 1616 no se había debido a ignorancia ni fanatismo.

Galileo entraba así en un cierto doble juego. Sin embargo, era optimista: Urbano VIII le había demostrado repetidas veces su amistad, concediéndole incluso beneficios eclesiásticos. Había llegado a afirmar, según testimonio del cardenal Zollern, que la Iglesia no había condenado el copernicanismo como doctrina herética, ni tenía intención de hacerlo, sino tan sólo como temeraria. Aun con todo, no aceptaba el heliocentrismo, y así lo había manifestado a Galileo, dándole un argumento que, según el Papa, era decisivo: ninguna prueba física en favor del sistema copernicano puede ser definitiva, pues Dios, en su omnipotencia, podría obtener esos mismos resultados por otros medios.

A principios de 1630 Galileo completó el manuscrito del *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, y viajó a Roma para obtener la autorización eclesiástica, pues deseaba publicarlo allí. Encontró un ambiente favorable. Sus amigos ocupaban puestos influyentes: Giovannibattista Ciampoli, secretario para la correspondencia con los príncipes, aseguró que el Papa quería que el libro se aprobase; el príncipe Federico Cesi, fundador y presidente de la Academia de los Linces, se iba a ocupar de la impresión; Niccoló Riccardi, Maestro del Palacio Apostólico, estaba dispuesto a conceder el *imprimatur* (permiso de impresión), con sólo algunas correcciones.

Galileo regresó a Florencia convencido de que todo estaba arreglado. Pero las cosas no marcharon como esperaba. Federico Cesi murió durante el verano, y la peste se declaró en el norte y centro de Italia, cortando las comunicaciones entre Roma y Florencia. Galileo decidió entonces publicar el *Diálogo* en Florencia, pero los acuerdos establecidos para la revisión se revelaron difíciles de poner en práctica, quizá porque Riccardi, que esperaba ajustar todo en fase de impresión, veía que el asunto se le escapaba de las manos.

Cuando los primeros ejemplares del *Diálogo* llegaron a Roma, a principios del verano de 1632, la situación se precipitó. El Papa ordenó, a través del Maestro del Palacio Apostólico, aunque inútilmente, que se detuviera la impresión y distribución del libro. Nombró una comisión especial para estudiar el caso, y al final del verano la cuestión fue deferida al Santo Oficio, que ordenó a Galileo comparecer en Roma. Galileo alegó su estado de salud, pero la protección del Gran Duque Ferdinando II no logró ahorrarle el viaje. En Roma, huésped de Francesco Niccolini, embajador de Toscana,



6. URBANO VIII (Bernini). El cardenal Maffeo Barberini (1568-1644) fue elegido papa en 1623. Amigo y admirador de Galileo, a quien había dedicado una composición poética, dio su consentimiento para la preparación del *Diálogo*. Su actitud hacia Galileo cambió radicalmente en 1632, cuando el *Diálogo* llegó a sus manos.

CARTA DE BELARMINO A FOSCANI (12 DE ABRIL DE 1615)

(...) Primero. Me parece que Vuestra Paternidad y el Señor Galileo actuarían prudentemente limitándose a hablar *ex suppositione* en vez de absolutamente, como he pensado siempre que habló Copérnico. Pues decir que, suponiendo que la Tierra se mueve y el Sol está quieto se salvan todas las apariencias mejor que con los excéntricos y epiciclos, se puede perfectamente, y no tiene ningún peligro, y eso es suficiente para el matemático [astrónomo]. Pero querer afirmar que realmente el Sol está en el centro del mundo, y sólo gira sobre sí mismo sin moverse de oriente a occidente, resulta muy peligroso, no sólo por irritar a todos los filósofos y teólogos escolásticos, sino también porque puede dañar a la santa fe, haciendo falsas las Escrituras (...)

2º. Como usted sabe, el Concilio [de Trento] prohíbe exponer las Escrituras contra el consenso común de los Santos Padres (...)

3º. Si se diese una verdadera demostración de que el Sol está en el centro del mundo y la Tierra en el tercer cielo, y que el Sol no gira alrededor de la Tierra, sino que la Tierra gira alrededor del Sol, entonces habría que explicar con mucha circunspección las escrituras que parecen contrarias, y más bien decir que no las entendemos, antes que decir que sea falso lo que se ha demostrado. Pero no creeré que exista tal demostración hasta que no me sea mostrada, y no es lo mismo demostrar que suponiendo que el Sol está en el centro y la Tierra en el cielo se salvan las apariencias, y demostrar que en realidad el Sol está en el centro y la Tierra en el cielo; pues pienso que la primera demostración se puede obtener, pero respecto a la segunda tengo muchas dudas, y en caso de duda no se debe abandonar la Escritura, tal como ha sido expuesta por los Santos Padres (...)



7. SANTA MARIA SOPRA MINERVA. En una sala adyacente a la sacristía del convento dominico de Santa María sopra Minerva tuvo lugar la sesión final del proceso, la sentencia y la abjura de Galileo.

hubo de esperar casi dos meses hasta el primer interrogatorio, el 12 de abril. Sólo entonces hubo de trasladarse al Palacio del Santo Oficio, por casi tres semanas. Allí le fueron asignadas algunas habitaciones del apartamento del Fiscal, gozando de libertad de movimiento y asistido por su propia servidumbre. Fue tratado siempre con gran deferencia.

¿Proceso a la ciencia?

Resulta sorprendente el escaso papel que las cuestiones de tipo científico desempeñaron en el proceso. En ningún momento se volvió a plantear si el sistema copernicano podía ser verdadero o falso. La línea de la acusación fue clara: publicando el *Diálogo* Galileo había contravenido la prohibición de defender, enseñar o sostener la doctrina de la estabilidad del Sol y del movimiento de la Tierra, que había recibido en 1616. Y puesto que al solicitar permiso para publicarlo había ocultado la existencia de este precepto, su comportamiento podía ser interpretado como doloso.

Galileo no hubiera podido, en ningún caso, llevar la discusión hacia cuestiones científicas. Pero tampoco lo intentó. Se refugió en lo que afirmaba en la introducción: que el *Diálogo* era imparcial. Era una defensa débil. Tres expertos examinaron el diálogo y concluyeron que, sin lugar a dudas, Galileo defendía y enseñaba tal doctrina, y muy probablemente también la sostenía.

Respecto a la prohibición de 1616, las cosas eran más complicadas. Galileo presentó un atestado del cardenal Belarmino, según el cual no había abjurado ni se le había impuesto ninguna pena, sino que sólo se le había comunicado la decisión del Indice según la cual la doctrina del movimiento de la Tierra y la inmovilidad del Sol es contraria a la Escritura, y no se puede defender ni sostener. No recordaba un precepto formal, ni la prohibición explícita de enseñar de ningún modo el sistema copernicano, aunque tampoco lo excluía: sencillamente no podía recordarlo. Pero un documento conservado en el Santo Oficio así lo afirmaba, y se convirtió en la prueba principal. Se ha puesto en duda su legitimidad, sugiriendo incluso que habría sido falsificado, pero esta tesis no parece contar con bases sólidas.

A los ojos del comisario del Santo Oficio, Vincenzo Maculano, la posición de Galileo hacía las cosas más difíciles. Un proceso inquisitorial no discutía la validez o falsedad de una doctrina. Intentaba sólo determinar si con su actuación el imputado había incurrido en ese delito, intentando que reconociese su error. En el caso de Galileo los hechos parecían evidentes: se le había impuesto un precepto, y publicando el *Diálogo* lo había violado. Pero se resistía a reconocerlo. Quizás esto alargó su estancia en el Santo Oficio, hasta que el comisario Maculano, en un coloquio extrajudicial, obtuvo una salida a la situación.

Galileo reconoció que se había excedido, por vanidad, al presentar sus argumentos en favor del sistema copernicano, aunque esa no había sido su intención. El comisario del Santo Oficio quedó satisfecho, pues como escribió al cardenal Francesco Barberini, eso permitiría que el caso concluyera rápidamente con una condena benigna.

Sin embargo Urbano VIII, que había manifestado desde el verano anterior su irritación ante lo que consideraba un abuso de confianza por parte de Galileo y sus amigos romanos (en especial Ciampoli y Riccardi), quiso que el caso fuera ejemplar. El 16 de junio, en la reunión del Santo Oficio, determinó la sentencia: Galileo sería condenado a prisión formal, y el *Diálogo* prohibido.

El 22 de junio Galileo fue a Santa María Sopra Minerva para recibir la sentencia y abjurar de sus opiniones. Como "prisión" se le asignó la villa de la embajada Toscana en el monte Pincio, Villa Medici. Urbano VIII ya había concedido al embajador que tras la sentencia sería posible determinar de qué modo ésta debería cumplirse. Algunos días más tarde se permitió a Galileo trasladarse a la residencia del Arzobispo de Siena, Ascanio Piccolomini, gran amigo suyo. A finales de año pudo regresar a su villa en las afueras de Florencia. Pero Urbano VIII se mantuvo intransigente, y la condena no le fue levantada nunca.

Ciencias y jerarquía del saber

Desde el punto de vista jurídico, el proceso fue disciplinar: la principal acusación fue la de haber violado el precepto impuesto en 1616. Pero la sentencia y la abjuración hacen referencia al movimiento de la Tierra y a la inmovilidad del Sol. Al ser declarado "vehementemente sospechoso de herejía", ¿se declaró

El autor

Rafael A. Martínez es profesor de filosofía de la ciencia en la Pontificia Universidad de la Santa Cruz (Roma), donde es también decano de la facultad de filosofía. Se ocupa de la evolución de los conceptos científicos y de la historia de las relaciones entre ciencia y religión. Su investigación en los archivos del Indice y del Santo Oficio ha llevado a la publicación de un manuscrito inédito sobre el caso Galileo y de un estudio sobre la primera reacción del Vaticano a las teorías evolucionistas (*Negotiating Darwin*, con M. Artigas y Th. F. Glick).

finalmente herética la teoría heliocéntrica? En tal caso el proceso habría tenido serias consecuencias doctrinales, abriendo un abismo entre ciencia y fe.

Esta lectura del caso Galileo es frecuente, pero presenta serias dificultades. Se debe recordar nuevamente que las decisiones del tribunal tenían contenido jurídico y penal, y no dogmático, que sólo poseería una declaración del Papa en primera persona, en la que el contenido dogmático se afirmara explícitamente. Y no hubo tal: Urbano VIII decidió la pena que debía ser aplicada, pero fueron los cardenales quienes decretaron la sentencia, por su propia autoridad.

En sus discusiones con el embajador Niccolini, Urbano VIII repitió varias veces que Galileo había osado entrar en cuestiones verdaderamente graves. ¿A qué se refería? ¿Creía Urbano VIII que la cosmología geocéntrica, como descripción física del universo, era una *verdad de fe*? No parece probable que sus ideas hubieran cambiado hasta ese punto, cuando algunos años antes, según el testimonio de Zollern, había afirmado lo contrario, y cuando su mismo argumento, la omnipotencia divina, podría ser usado en su contra (de hecho, Galileo lo hizo en el *Dialogo*).

La actitud de Urbano VIII a lo largo de su pontificado lleva a pensar que en la defensa del sistema copernicano veía un peligro mucho mayor, pero de otro orden: el desafío a la autoridad de la teología como instancia última capaz de definir el acuerdo de toda doctrina con la verdad de fe y, por tanto, para interpretar legítimamente el sentido de la Escritura.

Como sugiere Beretta, Galileo pudo ser visto como aliado del aristotelismo de Padua, que sostenía la posibilidad de una verdad filosófica aunque fuese contradictoria con la verdad teológica.

Otros factores pudieron concurrir a reforzar la actitud intransigente con Galileo: el recuerdo de Giordano Bruno; la situación política causada por la guerra de los treinta años; el sentimiento de Urbano VIII de haber sido traicionado por Ciampoli, Ricardi y Galileo. Hoy se excluyen, por el contrario, muchas teorías que veían en el caso Galileo una conspiración. No la hubo por parte de los jesuitas ni de los dominicos. La propuesta de Redondi, que veía en el atomismo de Galileo la verdadera causa de la condena, que la acusación de heliocentrismo habría intentado ocultar, ha perdido hoy toda credibilidad.

Desde el punto de vista de la ciencia resultó decisiva la incapacidad, por parte de teólogos y eclesiásticos, de reconocer que Galileo proponía un nuevo tipo de conocimiento a partir de la experiencia, y no una interpretación filosófica o teológica de la realidad. Esta actitud rígida, que respondía poco al sentido original de la teología como “fe que busca comprender” (*fides quaerens intelectum*), puso a Galileo frente a un falso dilema.

Galileo no volvió a ocuparse públicamente de problemas cosmológicos. Retomó el estudio del movimiento, iniciado en sus años de Pisa, y cinco años más tarde publicó los *Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, abriendo el camino de la futura mecánica newtoniana. Gracias a ella, la comprensión de la ciencia experimental se abrió paso poco a poco, transformando al mismo tiempo las relaciones entre los diversos campos del saber.

En 1757 Benedicto XIV mandó suprimir la prohibición general contra los libros copernicanos, aunque por una mezcla de inercia y rigidez las obras de Galileo, Copérnico y Kepler siguieron en el Indice casi otros cien años. El grave error cometido en 1616 y 1633 había dejado una huella profunda. Juan Pablo II pidió en 1979 que se reconocieran lealmente todos los errores, de cualquier parte que hubieran provenido. Tampoco ha sido fácil, y en cualquier caso reconocerlos no basta: es necesario aprender de ellos. Esta es una tarea que nunca puede darse por concluida.



8. VILLA MEDICI. Galileo fue condenado a “cárcel formal”, que en la práctica significaba un arresto domiciliario. Tras la sentencia se fijó como lugar para cumplir la condena la Villa ajardinada de la embajada toscana en el monte Pincio, al lado de Villa Borghese y Trinità dei Monti. Una semana después, se conmutó por la residencia del arzobispo de Siena, Ascanio Piccolomini, amigo de Galileo. A finales de año pudo volver a su villa en las afueras de Florencia.

Bibliografía complementaria

GALILEO FOR COPERNICANISM AND FOR THE CHURCH. Annibale Fantoli. LEV; Ciudad del Vaticano, 1996.

GALILEO EN ROMA. CRONICA DE 500 DIAS. William R. Shea y Mariano Artigas. Encuentro; Madrid, 2003.

GALILÉE EN PROCÈS, GALILÉE RÉHABILITÉ? Dirigido por Francesco Beretta. Éditions Saint-Augustin; Saint Maurice, 2005.

THE CHURCH AND GALILEO. Dirigido por Ernan McMullin. University of Notre Dame Press; Notre Dame, 2005.

RETRYING GALILEO, 1633-1992. Maurice A. Finocchiaro. University of California Press, Berkeley, 2005.

GALILEO OBSERVED: SCIENCE AND THE POLITICS OF BELIEF. William R. Shea y Mariano Artigas. Science History Publications; Sagamore Beach, 2006.



ESPIONAJE INFORMATICO

Los ladrones de información pueden saltarse las barreras de la encriptación, los protocolos de las redes y las defensas del sistema operativo > > > W. WAYT GIBBS

Vistas por el ocular del pequeño telescopio Celestron de Michael Backes, las letras del ordenador portátil —fuente de 18 puntos— se distinguían tan claramente como si estuviera descansando en mi regazo. Lo verdaderamente notable era que el ordenador no sólo se encontraba al fondo del pasillo, a una distancia de 10 metros, sino que su pantalla miraba en dirección opuesta. La imagen que tan legible resultaba era el reflejo de la pantalla en una jarra de cristal de una mesa cercana. Backes, en experimentos realizados en su laboratorio de la Universidad del Sarre, ha descubierto una extensa y alarmante panoplia de objetos aptos para reflejar secretos directamente desde las pantallas de nuestros equipos hacia una cámara fotográfica. Unas gafas, por ejemplo, resultan igualmente adecuadas, lo mismo que las tazas de café, las botellas de plástico, las joyas de metal pulido e incluso, según sus trabajos más recientes, los propios globos oculares del usuario. El mero hecho de examinar información se presta a revelarla.

El reflejo de las imágenes de una pantalla constituyen una más de las muchas formas en las que nuestros ordenadores dejan que se filtre información por canales indirectos: poros de los sistemas de seguridad que permiten esquivar las restricciones a las que fiamos la protección de nuestros datos reservados, basadas en la encriptación y en el sistema operativo. Se han mostrado recientemente al menos cinco procedimientos de captura subrepticia de, sea por caso, pulsaciones de teclas, sin instalación de ningún programa maligno en el ordenador-objetivo. En el caso de las redes, observadores técnicamente capacitados pueden extraer datos reservados registrando los destellos de los leds de los enrutadores y conmutadores, o escrutando minuciosamente las tenues ondas de radiofrecuencia que emiten todos los monitores. Ciertas impresoras pueden ser lo bastante ruidosas para permitir una escucha.

A excepción de unos pocos programas para uso militar, secretos, las investigaciones en seguridad informática han obviado en gran medida la protección contra estos ataques por canales



POR CANALES INDIRECTOS

JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración del reflejo*); DIGITAL VISION/GETTY IMAGES (*hombre con gafas*)

indirectos, y se han centrado, en cambio, en sistemas de encriptación y en crear protocolos de red cada vez más robustos e inexpugnables. Tal proceder, sin embargo, sólo puede resguardar la información que se encuentre en el interior del ordenador o de la red. Los ataques por medio de canales indirectos se dirigen a los puntos de contacto entre el ordenador y el mundo real, a menudo escasamente protegidos: los aledaños del teclado, de la pantalla o de la impresora, sea durante las fases previas a la encriptación de la información o una vez traducida a formas inteligibles por nosotros.

Estos ataques, además, no dejan huellas de accesos anómalos, ni archivos corruptos reveladores de un posible robo, ni rastros que permitan a los investigadores en seguridad informática averiguar con cuánta frecuencia se producen. Los expertos sólo están seguros de una cosa: siempre que la información sea vulnerable y posea valor, sea monetario o de inteligencia, será cuestión de tiempo que alguien trate de hacerse con ella.

Apantallamiento magnético

La idea de hacerse con información por canales indirectos es mucho más antigua que el ordenador personal. En la Primera Guerra Mundial, los servicios de espionaje de los beligerantes pudieron escuchar órdenes de combate enemigas debido a que los teléfonos de entonces utilizaban solamente un hilo, sirviendo la tierra de línea de retorno. Los espías clavaban en el suelo varillas metálicas que, conectadas a un amplificador, les permitían captar las conversaciones. Hace unos cuarenta años, los científicos militares estadounidenses empezaron a estudiar las ondas de radiofrecuencia que emitían los monitores de los ordenadores, y pusieron en marcha un plan, denominado "Tempest", para desarrollar técnicas de apantallamiento electromagnético, que todavía se utilizan en sistemas gubernativos o bancarios. Sin el apantallamiento Tempest, la imagen que se estaba proyectando línea a línea sobre la pantalla de un monitor típico de rayos catódicos se podía reconstruir desde una sala cercana —e incluso desde un edificio contiguo— sintonizando las señales electromagnéticas emitidas por el monitor.

Se creyó que con la creciente popularidad de las pantallas planas los problemas que abordaba Tempest serían cosa del pasado, porque las pantallas planas utilizan tensiones pequeñas y no exploran las imágenes línea por línea. Pero en 2003 Markus G. Kuhn, del Laboratorio de Informática de la Universidad de Cambridge, demostró que también las pantallas planas, incluidas las integradas en equipos portátiles, radian señales digitales desde sus cables de vídeo, señales que es posible recoger y descodificar a muchos metros de distancia.

CONCEPTOS BASICOS

- Aun con una óptima seguridad en red, los datos electrónicos pueden no estar a salvo de un pirata decidido.
- Se ha logrado extraer información del reflejo de la pantalla en el globo ocular del usuario o de los sonidos de una impresora.
- Resulta difícil lograr una protección total contra estos ataques e imposible su rastreo.

Disección de una oficina vulnerable

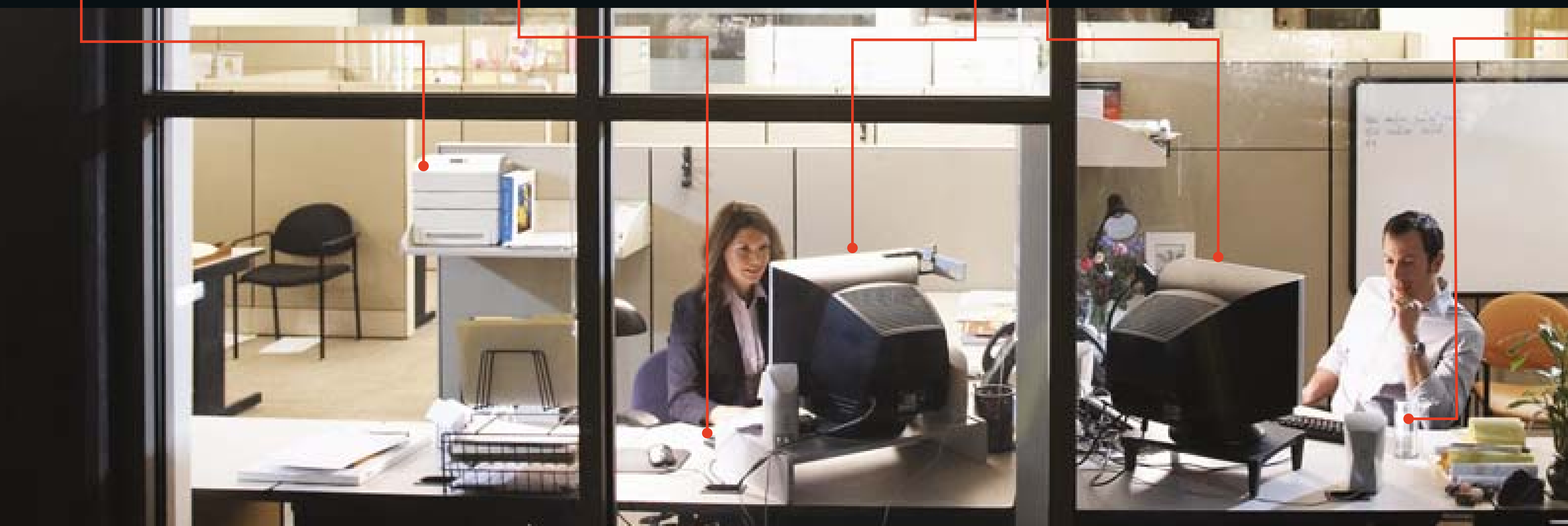
Se sabe ya cómo hacer que su propio despacho se vuelva contra usted. Espías bien preparados tendrían en cada reflejo, en cada sonido, en cada invisible impulso de radiación electromagnética cierta posibilidad de captar datos reservados. He aquí algunos puntos vulnerables detectados por expertos del mundo académico. A saber lo que otros menos comunicativos han podido descubrir.

IMPRESORA Los sonidos que producen las impresoras matriciales pueden permitir la reconstrucción de las palabras que se imprimían en ella (*véase el recuadro* "Espiar una impresora"). Un grupo está intentando ahora extender esa técnica a las impresoras de inyección de tinta, menos ruidosas.

TECLADO Cada tecla emite, al ser pulsada, una signatura electromagnética peculiar. Dos posgraduados han demostrado hace poco que, basándose en estas ondas de radio, podían reconstruir, al otro lado de una pared, las pulsaciones de un usuario distante 20 metros. Necesitaban sólo un receptor y una antena de cable muy sencilla.

WEBCAM Basta marcar un enlace indebido en un correo o una página de la Red para que un espía reciba las imágenes de una cámara conectada a su ordenador. ClearShot, un nuevo sistema automático capaz de descifrar las teclas pulsadas a partir de las señales de vídeo de la cámara, le permitiría a un fisgón registrar lo que se escribe mediante ese teclado.

PANTALLAS Ya se sabía que los clásicos monitores de rayos catódicos (como los de la figura) emiten radiación electromagnética suficiente para permitir la reconstrucción de la imagen de su pantalla. Según nuevas investigaciones, incluso las pantallas planas de cristal líquido son vulnerables.



JEN CHRISTIANSEN (*fotoilustración de impresora y vaso*); THOMAS NORTHCUT *Digital Vision* (*oficina*)

La pantalla se renueva al menos 60 veces por segundo; al suprimir, promediando, las partes invariables del motivo que contiene, se pueden deducir los píxeles que van cambiando, y de ellos, una copia legible de lo que esté mostrando la pantalla espiada.

"Hace treinta años, únicamente los proveedores de sistemas militares disponían de los equipos necesarios para efectuar los análisis electromagnéticos que esta clase de ataques exige", explica Kuhn. "En la actualidad podemos encontrarlos en cualquier laboratorio de electrónica bien equipado, aunque todavía son voluminosos. Pero, antes o después, acabarán estando disponibles en una tarjeta enchufable en un portátil".

De igual manera, material normal de radiovigilancia es capaz de registrar las pulsaciones efectuadas en un teclado ubicado en otra estancia, según Martin Vuagnoux y Sylvain Pasini, alumnos de posgrado en el Instituto Federal Suizo de Tecnología en Lausana. El ataque no depende de fluctuaciones de la fuente de alimentación, por lo que funciona incluso para los equipos portátiles, alimentados por batería, como los que vemos por docenas en las terminales de los aeropuertos.

Vaugnoux y Pasini han exhibido su proeza en un vídeo que han colgado en la Red, grabado en octubre de 2008. Ahora están preparando una ponencia para un congreso en la que exponen cuatro procedimientos distintos para deducir qué teclas han sido pulsadas, basándose en radiaciones electromagnéticas detectables hasta unos 20 metros de distancia, incluso con paredes interpuestas. Con uno de sus métodos más novedosos han logrado un 95 por ciento de aciertos. "En un teclado, para determinar qué tecla ha sido pulsada se muestrea una matriz organizada en filas y columnas", explica Kuhn, quien propuso uno de estos métodos hace unos 10 años, aunque nunca hizo una demostración práctica. "El proceso de muestreo emite débiles pulsos radioeléctricos; la distribución de los pulsos en el tiempo puede desvelar cuál ha sido la tecla presionada".

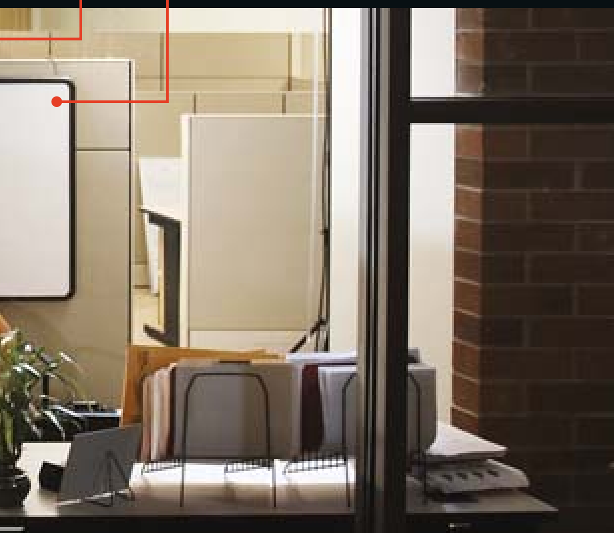
En mayo de 2008, un grupo dirigido por Giovanni Vigna, de la Universidad de California en Santa Barbara, publicó detalles sobre una quinta forma de captar pulsaciones de teclas que no requiere refinados receptores de radio: basta con una *webcam*, una pequeña cámara para vídeo por la Red, y unos programas informáticos bien ideados. El programa de Vigna, llamado ClearShot, se basa en imágenes de vídeo de los dedos del espiado cuando teclea. El programa consta de una combinación de algoritmos de rastreo de movimientos y

El autor

W. Wayt Gibbs, colaborador habitual de *Investigación y Ciencia*, es jefe de prensa de Intellectual Ventures, Bellevue (estado de Washington)

REFLEJOS Las superficies curvas de cristal resultan perfectas para husmear, porque captan reflejos de amplias zonas de la sala. Gracias a métodos informáticos de corrección de imágenes (*véase el recuadro* "Leer en un globo ocular"), un espía podría grabar así imágenes de la pantalla de su ordenador.

PANELES BLANCOS También es posible extraer imágenes de cualquier otra superficie reflectante, sea un reloj de pared, una cafetera metálica o una pizarra blanca.



de refinados modelos lingüísticos con el fin de deducir las palabras que con mayor probabilidad se están tecleando. Según Vigna, ClearShot es capaz de reconstruir el texto tecleado con una celeridad casi equiparable a la de los voluntarios humanos, aunque no con tanta precisión.

Podría parecer inverosímil que alguien pueda consentir que su propia cámara se utilice en su perjuicio. Pero la captación de la imagen de vídeo de una cámara puede lograrse de forma muy sencilla: engañando al usuario para que marque un enlace de una página de la Red de aspecto inocuo, proceso conocido como *clickjacking*. En octubre de 2008, Jeremiah Grossman, de WhiteHat Security, y Robert Hansen, de SecTheory, revelaron los puntos vulnerables que habían descubierto en muchos navegadores y en el programa Flash de Adobe; en conjunción, permiten que un sitio hostil de la Red recoja audio y vídeo del micrófono y la cámara del ordenador. Basta un solo clic errático para lanzar la vigilancia.

¡Ojo, que te ven!

No obstante, señala Backes, "casi todos estos métodos de interceptación están sólo al alcance exclusivo de expertos con conocimientos y equipos especializados. En cambio, el espionaje basado en los reflejos está al alcance de cualquiera que disponga de un telescopio de 500 euros, y resulta casi imposible defenderse totalmente de él".

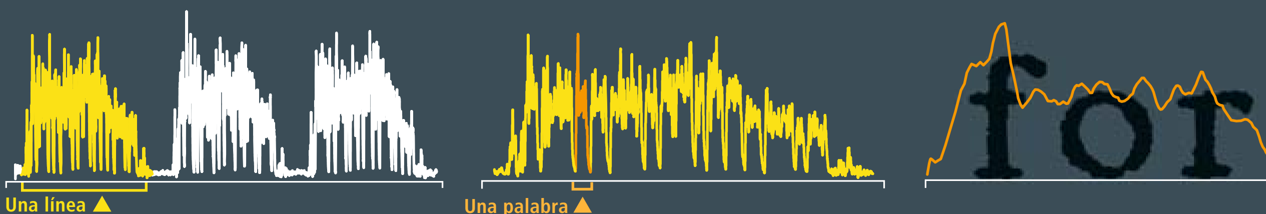
Backes, que es miembro del Instituto Max Planck para Sistemas Informáticos de Saarbrücken, y ya había alcanzado nombradía en el laboratorio de investigación de IBM en Zúrich antes de ingresar en los medios universitarios, dedica casi todo su tiempo a trabajar en problemas matemáticos subyacentes a la criptografía. Pero todos los años acomete con sus estudiantes un proyecto nuevo, sólo por gusto. Este año han confeccionado un programa que traduce registros sonoros de una impresora matricial —esa ruidosa variedad que suelen utilizar líneas aéreas, bancos y hospitales— en una imagen de la página que se estaba imprimiendo durante la grabación. El grupo de Backes, en vista del éxito de ese trabajo, ha estado realizando experimentos para ver si su método se prestaría para recuperar texto a partir de grabaciones sonoras de impresoras de inyección de tinta. Aunque, como explica Backes, "se trata de un trabajo

La forma más sencilla de extraer información, eludiendo elaborados sistemas de seguridad en red y sin dejar rastros, consiste en captar la que se filtra por canales indirectos.

ESPIAR UNA IMPRESORA

En una impresora matricial, el cabezal de impresión va golpeando una cinta entintada con cierto número de agujas (*pines*) de acero. Cada letra posee un sonido característico. Las letras altas, por ejemplo, requieren golpear con mayor número de agujas y hacen más ruido. La correlación no es perfecta; por ello, los investigadores empiezan conjeturando un probable mensaje impreso, que es sometido a un análisis lingüístico posterior para determinar cuál es la secuencia de letras más razonable.

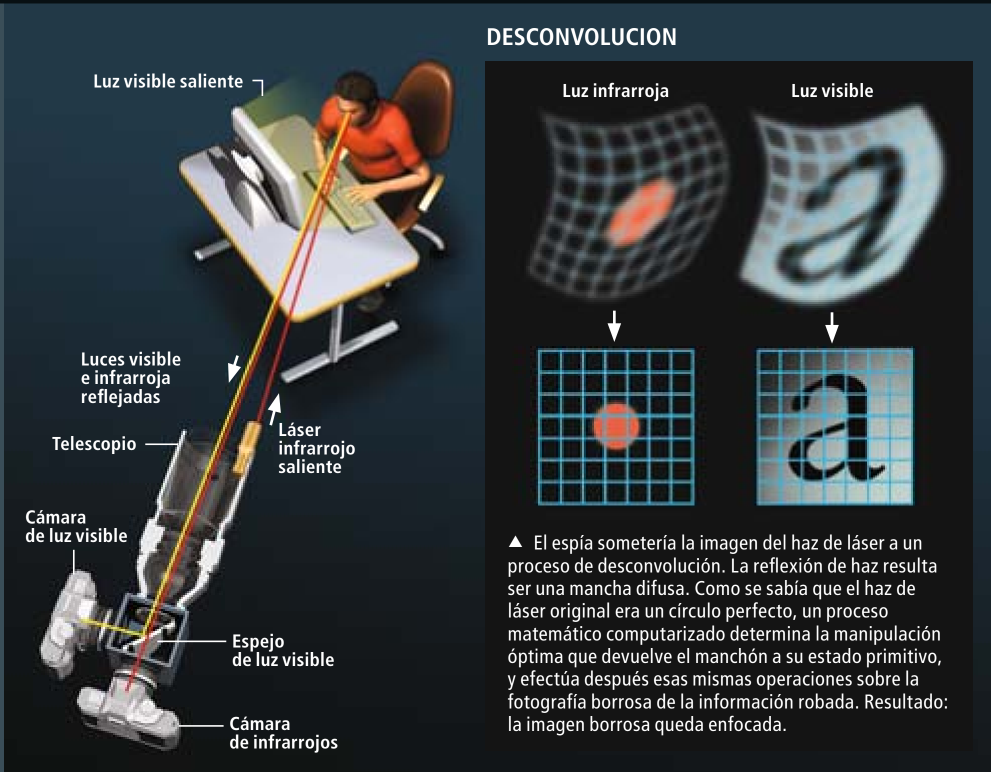
DE SONIDOS A TIPOS DE IMPRENTA



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: MARKUS DUERMUTH

LEER EN UN GLOBO OCULAR

Aunque la pantalla se refleja en el globo ocular del usuario, el espía tendría que vencer obstáculos considerables para registrar una imagen utilizable del contenido de la pantalla. Para recoger suficiente luz, un telescopio de gran aumento habría de tener una gran apertura óptica, y sólo podría enfocar una sección de muy poca profundidad: lo situado a unos cuantos milímetros por delante o por detrás del plano de enfoque aparecerá borroso. Además, el movimiento incesante de nuestros ojos difuminaría cualquier exposición que durase más de dos o tres centésimas de segundo. Para corregir estos problemas, el espía podría utilizar un sistema de óptica adaptativa (*diagrama*). El sistema haría que se reflejase en el ojo un haz de láser (infrarrojo, para no ser detectado) y registraría después el aspecto del haz reflejado en una cámara diferente de la encargada de capturar la imagen visible.



▲ El espía sometería la imagen del haz de láser a un proceso de desconvolución. La reflexión de haz resulta ser una mancha difusa. Como se sabía que el haz de láser original era un círculo perfecto, un proceso matemático computarizado determina la manipulación óptima que devuelve el manchón a su estado primitivo, y efectúa después esas mismas operaciones sobre la fotografía borrosa de la información robada. Resultado: la imagen borrosa queda enfocada.

mucho más difícil, porque las impresoras de inyección apenas hacen ruido".

El año pasado, la idea para el proyecto "informal" anual se le ocurrió a Backes al pasar cerca de una sala donde sus estudiantes de doctorado estaban tecleando furiosamente. "¿Qué será lo que se han tomado tan a pecho?", se preguntó. Y al observar un pequeño recuadro azul-blanco en una tetera que había en la mesa de uno de los estudiantes, la idea brotó. "Al día siguiente me compré, por algo más de 300 euros, un telescopio corriente, y una cámara digital de 6 megapíxeles".

El montaje funcionó sorprendentemente bien. Los tipos de tamaño medio resultaban claramente legibles al apuntar el telescopio a los reflejos en cucharas, copas de vino o relojes de pared. Servía prácticamente cualquier superficie brillante, pero las más adecuadas eran las superficies curvas, pues revelan amplios tramos de la sala y facilitan mucho la búsqueda de un lugar adecuado que haga visible el reflejo de la pantalla. Y, desde luego, todos los que utilizamos pantallas de ordenador tenemos un par de objetos casi esféricos y muy reflectantes incrustados en nuestros rostros. ¿No sería posible leer directamente los secretos informáticos en los ojos de sus poseedores?

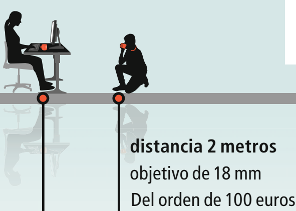
Backes sabía que, para averiguarlo, le haría falta un telescopio más potente y una cámara de mayor sensibilidad. Debido a que los globos oculares rara vez permanecen inmóviles más de un segundo o dos, la velocidad de obturación de la cámara debería ser elevada, para minimizar que la imagen se emborronase con el movimiento. Y Backes explica: "En el caso de los ojos, lo que limita la distancia a la que puede encontrarse el espía es el brillo de la imagen reflejada, no su resolución".

Adquirió entonces un telescopio de mil y pico euros, y pidió prestada al Instituto Max Planck de Astronomía de Heidelberg una cámara astronómica de 5000 euros. Ahora lograba leer texto de 72 puntos en el ojo de una persona situada a 10 metros. Calculó entonces que podría lograr mejores resultados tomando de la astronomía otra cosa: un proceso llamado desconvolución, que compensa la borrosidad

DON FOLEY (*sistema*); LUCY READING-IKKANDA (*alineación de telescopio*); JEN CHRISTIANSEN (*diagrama*)

TAMAÑOS Y DISTANCIAS:

El intento de leer un reflejo está limitado por la apertura óptica del telescopio. Si el cono de luz entrante es demasiado estrecho, la ampliación del telescopio oscurecerá el texto. Además, un telescopio grande es costoso y difícil de ocultar. El diagrama indica el tamaño de telescopio que se necesitaría a determinadas distancias para leer tipos de 14 puntos reflejados en una taza de café de 85 mm de diámetro. Para la lectura de reflejos en un ojo, habría que estar mucho más cerca: habría que dividir por cuatro, aproximadamente, las distancias expresadas.



distancia 2 metros
objetivo de 18 mm
Del orden de 100 euros



9 metros
objetivo de 80 mm
Del orden de 200 euros



22 metros
telescopio de 200 mm
Del orden de 1000 euros

de las fotografías de galaxias distantes. La idea consiste en medir cómo se difumina un punto de luz de la imagen original (una estrella o el reflejo de un diodo emisor de luz en un monitor) cuando lo capta la cámara. Una función matemática puede entonces invertir la borrosidad para restaurar el punto, confiriendo al mismo tiempo nitidez al resto de la imagen (*véase el recuadro* "Leer en un globo ocular"). Los programas de desconvolución rebajaron el umbral de legibilidad hasta tipos de 36 puntos distantes 10 metros para un telescopio que podría ocultarse fácilmente en un coche. Un telescopio mayor, instalado en un furgón, obtendría resultados mejores todavía.

Backes presentó estos resultados en una ponencia del simposio sobre seguridad y privacidad del IEEE celebrado en mayo de este año, pero ya cuenta con ideas para mejoras ulteriores. "Un verdadero espía podría apuntar un láser invisible sobre el objetivo", hace notar. Ello permitiría el enfoque automático sobre el globo ocular y una mejor desconvolución del difuminado por movimiento. Los espías podrían utilizar programas de HeliconSoft, que permiten ensamblar una imagen clara de un objeto combinando muchas imágenes parcialmente borrosas: sólo se retienen las porciones que están bien enfocadas. Podrían valerse, asimismo, de programas de tratamiento de imágenes de gran rango dinámico con el fin de crear una fotografía de buen contraste a partir de imágenes tomadas con una variedad de tiempos de exposición.

Ocultarse

En ciertos aspectos, resulta mucho más difícil protegernos de lo muy comunicativos que son nuestros ordenadores que defendernos del correo basura, el *phishing* y los virus. No es posible instalar programas capaces de bloquear los canales indirectos: no hay programas así. Por otra parte, tampoco está claro que alguien esté aprovechando esos resquicios. Backes y Kuhn opinan que es de suponer, sin temor al error, que las organizaciones militares han utilizado este tipo de técnicas con fines de espionaje, pero no pueden citar ejemplos concretos.

Las persianas del despacho de Backes estaban bajadas mientras hablábamos de estas posibilidades, y obviamente basta correr las cortinas para frustrar a quienes fisguen los reflejos. Pero Backes señala que sería una ingenuidad suponer que todo el mundo vaya a acordarse de cerrar las ventanas, o que pueda hacerlo. Aunque muchos usuarios de portátiles los dotan de "filtros de privacidad" para evitar que sus pantallas puedan ser vistas por fisgones, esos filtros aumentan el brillo de los reflejos en los ojos del usuario, lo que le facilita el trabajo al espía.

Las pantallas planas emiten luz polarizada, por lo que, en un principio, recubriendo los cristales de las ventanas con un filtro polarizador se podrían bloquear los reflejos de todas las pantallas. En la práctica, sin embargo, esta solución no funcionaría. Es normal que en el ángulo de polarización de las pantallas haya pequeñas diferencias, y los pequeños desajustes resultantes podrían dejar escapar la luz suficiente para que un buen telescopio pudiera todavía resolver la pantalla.

Según Kuhn, en comparación con las formas corrientes de espionaje informático, los ataques por canales indirectos sí sufren un par de grandes limitaciones. "Se ha de estar cerca del objetivo y se ha de estar observando mientras el usuario accede activamente a la información. Resulta mucho más sencillo convencerle de que abra un documento adjunto en un correo e instalar un programa malicioso que abra un portillo trasero en todo su sistema. Y eso se puede hacer con millones de personas a la vez".

Por esa razón, es improbable que los canales indirectos lleguen a ser tan frecuentes como el *spam*, los programas maliciosos u otros intentos de asalto desde la Red. Sí resulta verosímil que sean utilizados para espiar o infiltrarse en unos cuantos objetivos sumamente lucrativos, como los ordenadores de financieros o de altos funcionarios de organizaciones bancarias o gubernativas. Es probable que en tales casos las filtraciones por canales indirectos ofrezcan la forma más sencilla de esquivar sistemas de seguridad en red muy refinados, y de hacerlo sin dejar huella alguna que los servicios de seguridad puedan rastrear posteriormente. Pruebas anecdóticas sugieren que tal vigilancia ya se está realizando. "En los bancos de inversión se mencionan casos de información desaparecida, y están seguros de que no se trató del ataque típico del pirata informático, ni de personal de limpieza que duplicó un disco duro", afirma Kuhn. "Pero, que yo sepa, nadie ha sido atrapado *in fraganti*".

Bibliografía complementaria

CLEARSHOT: EAVESDROPPING ON KEYBOARD INPUT FROM VIDEO. Davide Balzarotti, Marco Cova y Giovanni Vigna en *Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, págs. 170-183; 18-22 de mayo, 2008.

COMPROMISING REFLECTIONS, OR, HOW TO READ LCD MONITORS AROUND THE CORNER. Michael Backes, Markus Dürmuth y Dominique Unruh en *Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy*, págs. 158-169; 18-22 de mayo, 2008.

COMPROMISING ELECTROMAGNETIC EMANATIONS OF WIRED AND WIRELESS KEYBOARDS. Martin Vuagnoux y Sylvain Pasini. Página en la Red del Instituto Federal Suizo de Tecnología: http://lasecwww.epfl.ch/keyboard



40 metros
telescopio de 350 mm
Del orden de 5000 euros



57 metros
telescopio de 500 mm
Del orden de 8000 euros

CRISIS ALIMENTARIAS: ¿UNA AMENAZA PARA LA CIVILIZACION?

La escasez de alimentos en los países pobres podría provocar el hundimiento de sus gobiernos. El origen de esta amenaza para la estabilidad mundial se halla en la continua degradación del medio

LESTER R. BROWN

CONCEPTOS BASICOS

- La escasez de alimentos y su repercusión en el encarecimiento de los víveres arrastran hacia el caos a los países pobres.
- Estos infortunados países exportan enfermedades, terrorismo, drogas, armas y refugiados.
- La falta de agua, la pérdida de suelo y el aumento de las temperaturas asociado al calentamiento global imponen serias limitaciones a la producción de alimentos.
- Esos tres factores ambientales reclaman una intervención enérgica y pronta para evitar una cadena de crisis estatales que amenazarían el orden mundial.

Una de las cosas que más trabajo nos cuestan es prevenir los cambios repentinos. Ideamos el futuro a partir de extrapolaciones del pasado. Este enfoque suele darnos buenos resultados; sin embargo, en ocasiones falla espectacularmente y nos dejamos cegar por acontecimientos como la actual crisis económica.

La idea de que la civilización llegue un día a desintegrarse quizá parezca descabellada. ¿Quién no se resistiría a tomar en serio un cambio tan radical de nuestras expectativas ordinarias? ¿Qué debería ocurrir para que hiciéramos caso de una advertencia tan terrible y cómo podríamos hacerle frente? Estamos tan habituados a escuchar una larga lista de catástrofes improbables, que automáticamente las despachamos con un gesto irónico: claro, nuestra civilización se hundirá en el caos, ¡y la Tierra va a chocar con un asteroide!

Durante muchos años he estudiado, desde una óptica global, la agricultura, la población, las tendencias ambientales y económicas, y sus interacciones. La combinación de tales factores con las tensiones políticas que éstos generan apunta hacia el colapso de gobiernos y sociedades. Con todo, también yo me he resistido a la idea de que la escasez de alimentos haga sucumbir no ya algunos gobiernos, sino la civilización entera.

Pero hoy no puede ignorarse tal amenaza. Nuestro persistente fracaso en la reparación del daño ambiental que está socavando la economía alimentaria mundial (sobre todo, el descenso de los niveles freáticos, la erosión del suelo y la subida de temperaturas) me obliga a concluir que tal desastre es posible.

Países al borde del colapso

Un sumario examen de los signos vitales de nuestro mundo actual ratifica, mal que nos pese, la conclusión anterior. Y quienes estudiamos el medio llevamos casi tres decenios sin apreciar esfuerzo alguno por combatir uno solo de tales efectos.

En seis de los nueve últimos años, la producción mundial de cereales ha sido inferior al consumo, lo cual ha conllevado una merma persistente de las reservas. Al iniciarse la cosecha de 2008, los excedentes equivalían a 62 días de consumo, casi un récord de mínimos. Como respuesta, los precios de los cereales alcanzaron en primavera y verano del año pasado el nivel más alto de la historia.

Al crecer la demanda de alimentos más deprisa que el suministro, la inflación en los precios resultante impone una grave tensión a los gobiernos de unos países que ya se tambalean al borde del caos. Sin medios para comprar cereales ni cultivarlos, las masas hambrientas

1. CLAMOR INFANTIL por la comida en la aldea de Dubie, República Democrática del Congo. Diciembre de 2005.

PER-ANDERS PETTERSSON *Getty Images*



AL BORDE DEL COLAPSO

Una vez al año, el Fondo por la Paz y el Fondo Carnegie para la Paz Internacional realizan conjuntamente un análisis con arreglo a doce indicadores de bienestar social, que incluyen aspectos económicos, sociales, políticos y militares. Clasificados de peor a mejor según su puntuación combinada en 2007, se presentan aquí los 20 países del mundo más próximos al colapso:

- Somalia
- Sudán
- Zimbabwe
- Chad
- Irak
- República Democrática del Congo
- Afganistán
- Costa de Marfil
- Pakistán
- República Centroafricana
- Guinea
- Bangladesh
- Birmania (Myanmar)
- Haití
- Corea del Norte
- Etiopía
- Uganda
- Líbano
- Nigeria
- Sri Lanka

FUENTE: "The Failed States Index 2008", Fund for Peace y Carnegie Endowment for International Peace, en Foreign Policy, *julio/agosto 2008*

invaden las calles. No es retórica. Antes de la fuerte subida de los precios del grano en 2008, había cada vez más estados bordeando el colapso. Gran parte de sus problemas provienen de no haber sabido controlar el crecimiento demográfico. Pero si el abastecimiento de víveres sigue empeorando, países enteros se desmoronarán a un ritmo acelerado.

Hemos iniciado una nueva era geopolítica: en el siglo xx, la mayor amenaza a la seguridad internacional venía de los conflictos entre las superpotencias; hoy, de estados que se desploman. El peligro ya no reside en la concentración de poder, sino en su ausencia.

Los estados fracasan cuando los gobiernos han dejado de ofrecer seguridad personal, seguridad alimentaria y servicios sociales básicos, como la educación y la atención sanitaria. Entonces suelen perder el control sobre una parte o la totalidad de su territorio. Cuando los gobiernos no monopolizan el poder, la ley y el orden, comienza su desintegración. Llega un momento en que los cooperantes que participan en proyectos de ayuda alimentaria sufren tales riesgos, que los programas deben suspenderse. En Somalia y Afganistán, el deterioro de la situación amenaza seriamente las intervenciones de ayuda.

Estos países en crisis crean también preocupación internacional: son un vivero de terroristas, drogas, armas y refugiados, que desestabiliza la política a escala global. Somalia, número uno de la lista, se ha convertido en una base de piratas. El número cinco, Irak, es un nido de entrenamiento de terroristas. Afganistán, séptimo país reseñado, es el primer productor mundial de heroína. Tras el genocidio masivo de Ruanda en 1994, los refugiados de ese castigado país, entre ellos miles de soldados armados, contribuyeron a desestabilizar la vecina República Democrática del Congo (sexto en la lista).

Nuestra civilización global depende de una red de naciones con una situación política saludable que controlen la propagación de enfermedades infecciosas, gestionen el sistema monetario internacional, mantengan controlado el terrorismo y persigan muchos otros objetivos comunes. Si el sistema de control de infecciones (poliomielitis, síndrome respiratorio agudo y gripe aviar, entre otras) se deshiciera, la humanidad correría un grave peligro. Cuando los estados entren en quiebra, nadie reconocerá los préstamos recibidos del exterior. Y la desintegración de un número suficiente de países amenazaría la estabilidad de toda la civilización.

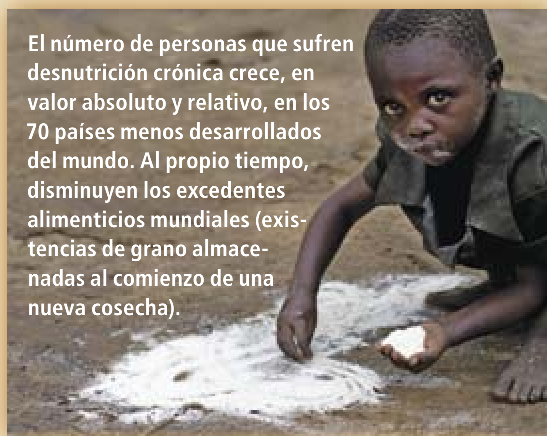
Un nuevo tipo de escasez alimentaria

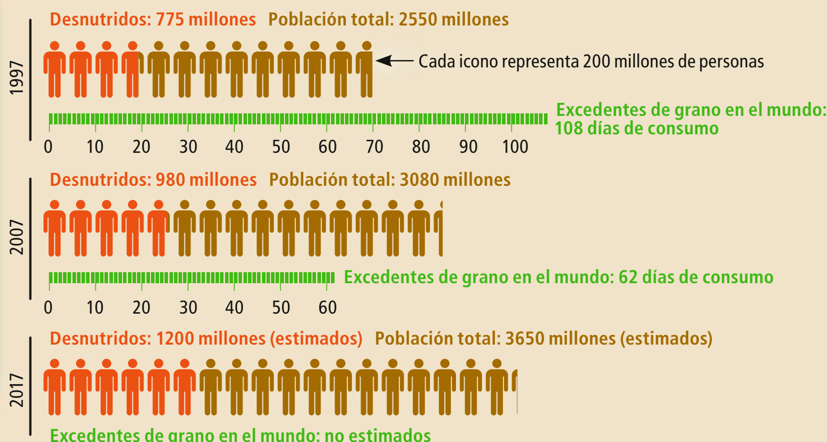
El encarecimiento mundial de las semillas en 2007 y 2008 —y la amenaza que ello entraña para la seguridad alimentaria— revistió un carácter diferente, más perturbador que las subidas de precio anteriores, algunas muy notables, acaecidas en la segunda mitad del siglo xx. En 1972, la Unión Soviética advirtió pronto la escasez de su cosecha y acaparó calladamente el mercado mundial de trigo. En consecuencia, los precios del trigo en los demás países subieron a más del doble, arrastrando consigo los precios del arroz y el maíz. Ahora bien, estas y otras subidas obedecían a sucesos singulares: la sequía en la URSS, el fallo del monzón en India y el calor que agostó las cosechas en el cinturón de maíz estadounidense ("Corn Belt"). Además, las subidas no fueron duraderas; los precios volvieron a la normalidad en la siguiente cosecha.

Por el contrario, el reciente encarecimiento mundial de los cereales responde a una diná-

YASUYOSHI CHIBA *Getty Images*

Cifras que corren en sentido inverso





FUENTES: Departamento de Agricultura de EE.UU., Oficina del Censo de EE.UU. en 2008

mica global. Difícilmente bajarán los precios, si antes no se invierte esa tendencia. Del lado de la demanda: cada año hay 70 millones de bocas nuevas que alimentar, crece el número de personas deseosas de escalar la cadena alimentaria para consumir productos de ganadería que requieren cereales [*véase* "Alimentación y efecto invernadero", por Nathan Fiala; Investigación y Ciencia, abril de 2009] y en EE.UU. se destina gran cantidad de cereal a las destilerías de etanol combustible.

La demanda extra de cereales asociada al crecimiento varía de un país a otro. En los países de renta baja como India, donde los cereales aportan el 60 por ciento de calorías de la dieta, el consumo directo individual ronda el medio kilogramo al día. Esa cantidad se cuadruplica en los países ricos, como EE.UU. y Canadá, aunque tal vez un 90 por ciento se consuma de forma indirecta a través de carne, leche y huevos de animales alimentados con cereales.

Los países de menor renta poseen una capacidad enorme de aumentar el consumo de cereales conforme crece su riqueza. Pero eso no es nada ante la insaciable demanda de combustibles de automoción de origen vegetal. La cuarta parte de la cosecha de este año en EE.UU. (suficiente para alimentar a 125 millones de estadounidenses o 500 millones de indios) se destinará a los automóviles. Sin embargo, aunque la cosecha de grano estadounidense se dedicara íntegramente a la producción de etanol, no llegaría a cubrir el 18 por ciento de las necesidades nacionales de automoción. Con el cereal necesario para llenar el depósito de 90 litros de un todoterreno podría alimentarse una persona durante un año.

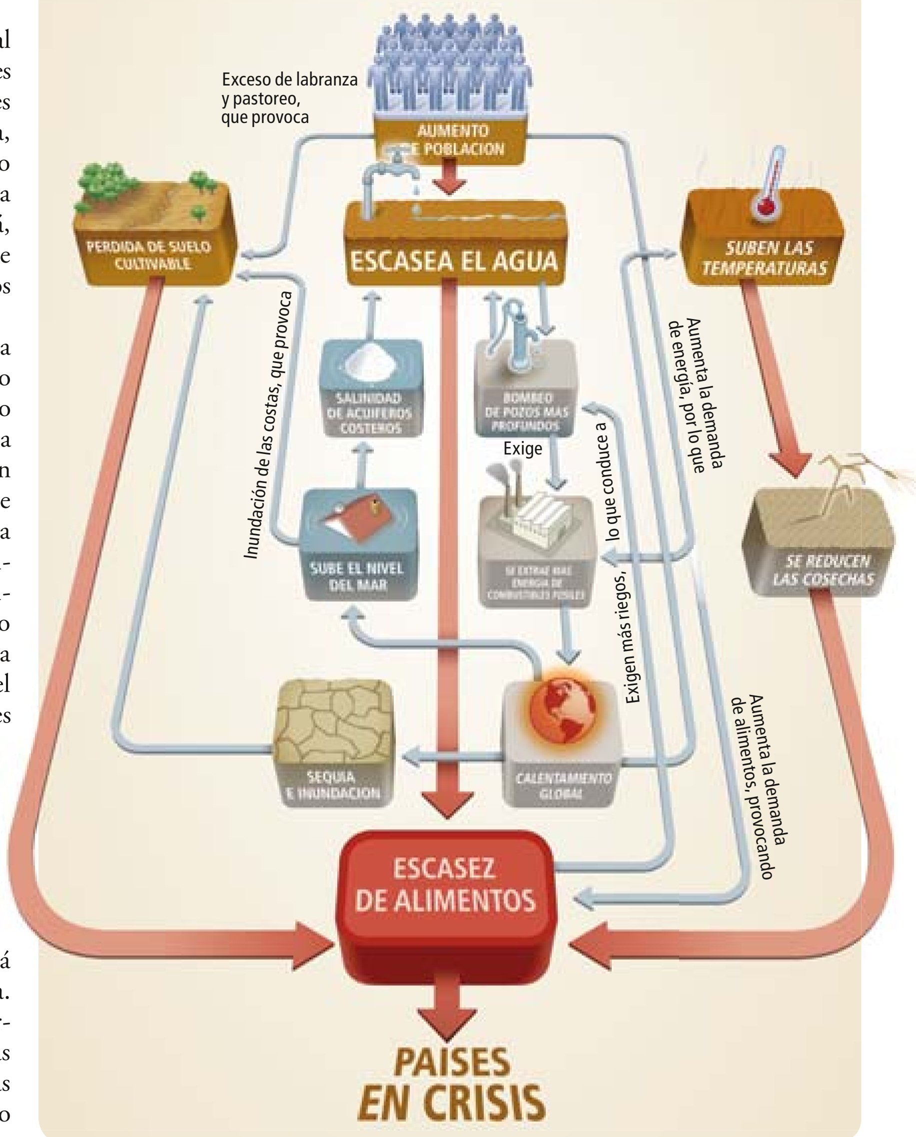
La reciente fusión de las economías alimentaria y energética implica que si el grano tiene menos valor como alimento que como fuente de combustible, el mercado desplazará los cereales hacia la producción de energía. Esta doble demanda desencadena una encarnizada competición entre coches y personas por el suministro de cereales, con inusitadas dimensiones políticas y morales. En su esfuerzo —mal orientado— por reducir la dependencia del crudo extranjero mediante la sustitución por combustibles de origen orgánico, EE.UU. está creando una inseguridad alimentaria global sin precedentes.

Sin agua no hay comida

En cuanto al abastecimiento de cereales, los tres factores ambientales ya citados (escasez de agua dulce, pérdida de suelo cultivable y aumento de las temperaturas) dificultan cada vez más que las provisiones de grano crezcan a un ritmo suficiente para atender la demanda. De todas esas tendencias, sin embargo, la amenaza más inminente es la falta de agua. El desafío mayor proviene del riego, que consume el 70 por ciento del agua dulce del planeta. Hay millones de pozos de riego en numerosos países que bombean agua de manantiales subterráneos más deprisa de lo que permite su recarga por precipitación. En consecuencia, menguan las capas freáticas en los países donde habita la mitad de la población mundial, incluidos los tres grandes productores de cereales: China, India y EE.UU.

Factores clave en la escasez alimentaria

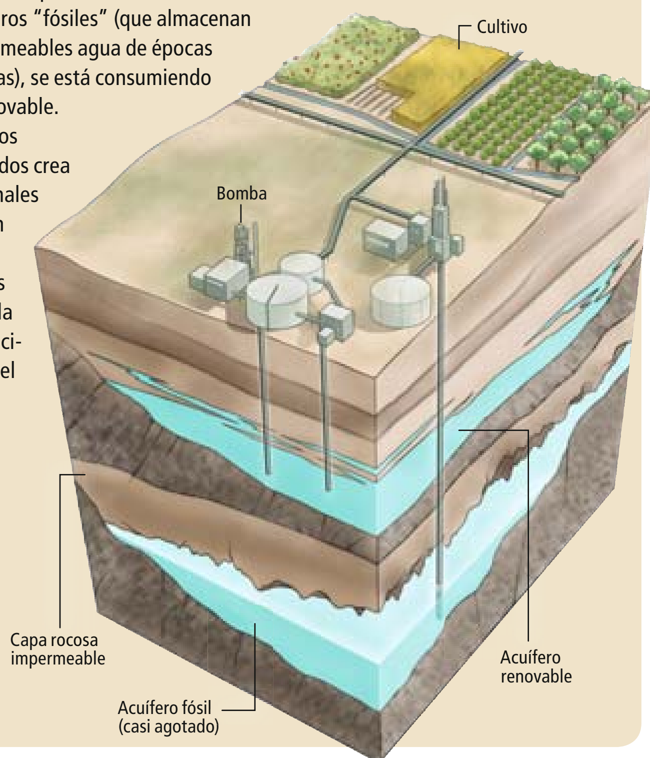
Se extiende la escasez de alimentos, causa principal del fracaso de los gobiernos. La falta de víveres obedece a un complejo entramado de causas, efectos y reacciones que suele agravar la repercusión que tendría cualquier factor aislado. El diagrama ilustra las relaciones entre algunos de los factores más comunes. Según el autor, las carencias alimentarias actuales no provienen de cosechas arruinadas por el mal tiempo, sino de cuatro factores que resultan críticos a largo plazo (*abajo*): crecimiento demográfico elevado, pérdida de suelo cultivable, escasez de agua dulce y subida de las temperaturas.



SAMUEL VELASCO 5W Infographics

Riegos que provocan escasez de agua

La mayor parte (70 por ciento) del agua dulce consumida se dedica al riego. El riego resulta esencial para la mayoría de los cultivos de alto rendimiento, pero muchos de los acuíferos que alimentan ese riego no se reponen en cantidad suficiente por las lluvias. Además, cuando se perforan acuíferos "fósiles" (que almacenan entre capas impermeables agua de épocas geológicas pasadas), se está consumiendo un recurso no renovable. El bombeo de pozos cada vez más hondos crea problemas adicionales de otro género: un gran consumo de energía. En ciertos estados de India, la mitad de la electricidad se emplea en el bombeo de agua.



Habitualmente, los acuíferos se renuevan por lluvia, pero no así algunos de los más importantes: los acuíferos "fósiles", que almacenan agua de épocas geológicas pasadas. El agotamiento de tales acuíferos (como el enorme de Ogallala, que corre bajo las grandes llanuras de EE.UU., el acuífero saudí y el que yace a gran profundidad bajo la Llanura del Norte de China) señalaría el final del bombeo. En las regiones áridas, esta pérdida podría además poner fin a la agricultura.

En China, desciende con rapidez la capa freática de la Llanura del Norte, región que produce más de la mitad del trigo y la tercera parte del maíz de todo el país. El bombeo excesivo ha consumido gran parte del acuífero superficial y obliga a taladrar en el acuífero más profundo, que no es renovable. Un informe del Banco Mundial augura consecuencias catastróficas para las generaciones futuras, a menos que se restablezca pronto el equilibrio entre el consumo y las aportaciones de agua.

Mientras descienden las capas freáticas y se secan los pozos de riego, la cosecha de trigo en China, la más abundante del mundo, ha caído en un ocho por ciento desde el máximo de 123 millones de toneladas que alcanzara en 1997. Durante ese período, la producción de arroz ha bajado un 4 por ciento. La nación más poblada del planeta quizá tenga que importar cereales en grandes cantidades.

Más preocupante todavía es la falta de agua en India. Allí, el margen entre el consumo de víveres y la supervivencia es más precario. Los millones de pozos de riego han hecho descender las capas freáticas en casi todo el país. Según un informe de Fred Pearce en *New Scientist*, "Se han secado la mitad de los tradicionales pozos excavados a mano y millones de acuíferos más superficiales, provocando numerosos suicidios entre quienes dependen de su aportación. Los apagones eléctricos alcanzan proporciones de epidemia en lugares donde se utiliza electricidad para extraer agua desde profundidades de hasta un kilómetro."

Según un estudio del Banco Mundial, el 15 por ciento del suministro de alimentos en India depende de la extracción de agua subterránea. Dicho de otro modo, 175 millones de indios consumen cereales producidos con agua de pozos de riego que pronto estarán agotados. La disminución continuada de las aportaciones hídricas conduciría a una escasez de víveres ingobernable y a un violento conflicto social.

A menos suelo, más hambre

El panorama de la segunda tendencia preocupante (la pérdida de suelo) no es menos sobrecogedor. La erosión de la capa superior del suelo es más rápida que la formación de suelo nuevo, acaso en un tercio de la tierra cultivable del planeta. Esa fina capa de nutrientes vegetales básicos, verdadero cimiento de la civilización, necesitó largas eras geológicas para formarse, aunque su profundidad alcanza sólo unos quince centímetros. Su pérdida por la erosión del viento y el agua arrasó civilizaciones de la antigüedad.

En 2002, un equipo de las Naciones Unidas examinó la situación alimentaria en Lesotho, país de dos millones de habitantes confinado en Sudáfrica. Las conclusiones fueron contundentes: "La agricultura en Lesotho se enfrenta a un futuro catastrófico; las cosechas disminuyen y podrían desaparecer en gran parte del país si no se adoptan medidas para invertir el proceso de erosión, degradación y descenso de la fertilidad del suelo".

En el hemisferio occidental, Haití (uno de los primeros estados que se reconoció en apuros) se autoabastecía de grano hace 40 años. En el tiempo transcurrido, sin embargo, ha perdido casi todos sus bosques y gran parte de la capa superior del suelo; ahora debe importar más de la mitad de los cereales que consume.

El autor

Lester R. Brown es uno de los pensadores de mayor influencia mundial. Prohombre del movimiento ambiental, fundó el Instituto para la Vigilancia del Mundo (Worldwatch Institute, 1974) y el Instituto de Políticas de la Tierra (Earth Policy Institute, 2001), que actualmente preside. Brown ha recibido múltiples premios y distinciones, incluidos 24 títulos honoríficos y una beca de la Fundación MacArthur.

SAMUEL VELASCO 5W *Infographics*

La tercera, y quizá más difusa, amenaza para la seguridad del abastecimiento de víveres corresponde al calentamiento global, que afecta a las cosechas en todas partes. En numerosos países, los cultivos se mantienen a una temperatura más o menos óptima para su buen rendimiento; una ligera subida de las temperaturas durante la época de crecimiento puede disminuir la cosecha. Un estudio publicado por la Academia Nacional de Ciencias estadounidense ha confirmado una regla general de la agricultura ecológica: el aumento de un grado Celsius por encima de lo normal hace disminuir en un 10 por ciento las cosechas de trigo, arroz y maíz.

La famosa "revolución verde" de los años sesenta y setenta del siglo pasado fue resultado de innovaciones en el uso de fertilizantes, sistemas de riego y variedades productivas de trigo y arroz; la creciente demanda de alimentos se pudo atender mediante la aplicación de métodos científicos y técnicas adecuadas. Esta vez, lamentablemente, muchos de los avances agrícolas más productivos se han puesto ya en práctica, por lo que está cayendo el ritmo de aumento a largo plazo de la productividad de la tierra. Entre 1950 y 1990, la productividad mundial de cereales experimentó un aumentó de más del dos por ciento anual, por delante del crecimiento demográfico. Pero desde entonces, el ritmo ha bajado a poco más del uno por ciento anual. En algunos países, las cosechas parecen aproximarse a su límite práctico, como las de arroz en Japón y China.

Algunos expertos sugieren que los cereales transgénicos ofrecerían una salida del apuro. Por desgracia, ninguna variedad transgénica ha conseguido rendimientos espectaculares, equiparables a las cosechas dobles o triples de trigo y arroz recolectadas durante la revolución verde. Y no parece que vayan a lograrlo, por la sencilla razón de que las técnicas de cruzamiento casi han agotado su potencial de elevar el rendimiento de los cultivos.

Competición por la comida

El análisis de la seguridad nutricional del planeta revela una peligrosa estrategia de escasez alimentaria: ciertos países actúan con estrechas miras en su propio interés y no hacen sino empeorar la situación de otros muchos. La tendencia se inició en 2007, cuando Rusia y Argentina, destacados productores de trigo, limitaron o prohibieron sus exportaciones, con la esperanza de elevar el suministro local y reducir así el precio de los alimentos en el ámbito doméstico. Por la misma razón, Vietnam, segundo exportador mundial de arroz después de Tailandia, prohibió las exportaciones durante meses. Estas decisiones acaso tranquilicen a quienes habitan en esos países, pero crean pánico en los países importadores, que deben confiar en los excedentes mundiales de cereales.

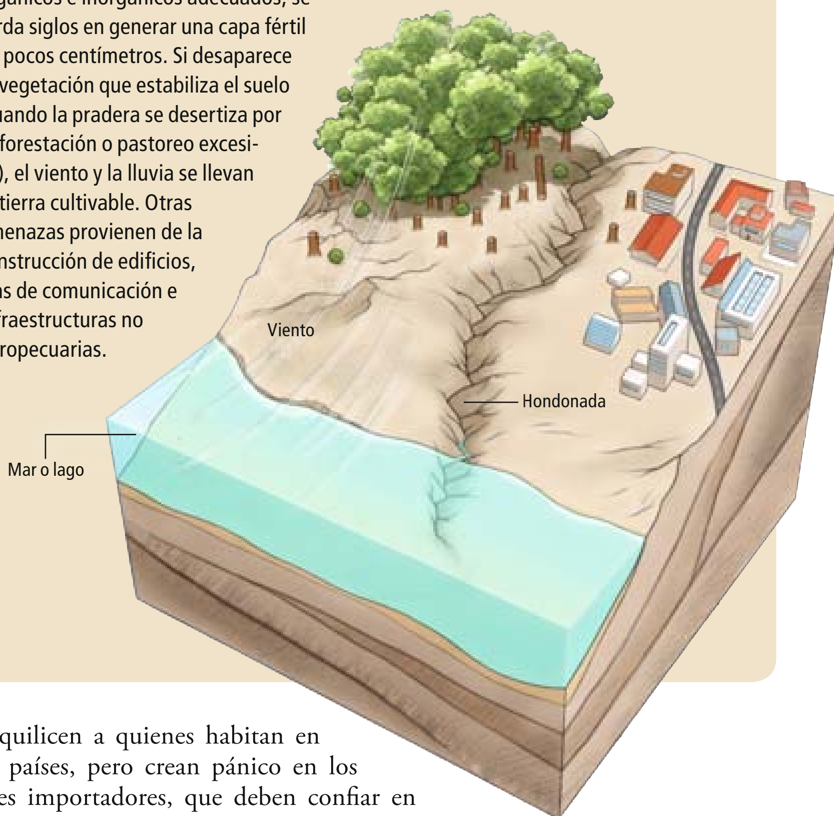
Para hacer frente a tales restricciones, los importadores de grano intentan cerrar acuerdos bilaterales a largo plazo que aseguren el suministro futuro. Filipinas, que ya no puede confiar en conseguir arroz del mercado mundial, negoció en fecha reciente un contrato a tres años con Vietnam que le garantiza el suministro de 1,5 millones de toneladas de arroz por año. La ansiedad por la importación de alimentos provoca incluso que estos países intenten comprar o alquilar terreno cultivable allende sus fronteras.

Pese a tales medidas, el encarecimiento de las subsistencias y la propagación del hambre en muchos otros países empiezan ya a descomponer el orden social. En varias provincias de Tailandia, los asaltos de los "ladrones de arroz" obligan a los aldeanos a proteger de noche con armas de fuego sus arrozales. Todos los camiones de cereales en Pakistán llevan escolta militar. En Sudán, fueron secuestrados, durante la primera mitad de 2008, 83 camiones que transportaban cereales hacia los campos de refugiados de Darfur.

Ningún país es inmune a los efectos de las restricciones de víveres. Ni siquiera EE.UU.,

Desaparece la tierra de cultivo

La capa superior del suelo, otro factor vital para mantener el suministro alimentario del planeta, es también un recurso no renovable; incluso en un ecosistema sano que cuente con la humedad y los materiales orgánicos e inorgánicos adecuados, se tarda siglos en generar una capa fértil de pocos centímetros. Si desaparece la vegetación que estabiliza el suelo (cuando la pradera se desertiza por deforestación o pastoreo excesivo), el viento y la lluvia se llevan la tierra cultivable. Otras amenazas provienen de la construcción de edificios, vías de comunicación e infraestructuras no agropecuarias.



SAMUEL VELASCO 5W Infographics

AMENAZAS PROCEDENTES DE LOS PAISES EN CRISIS

Cuando el gobierno de un país ya no es capaz de ofrecer seguridad ni servicios básicos a sus ciudadanos, el caos social resultante puede causar graves daños más allá de sus fronteras:

- **Contagio de enfermedades**
- **Refugio de terroristas y piratas**
- **Tráfico de drogas y armas**
- **Fomento del extremismo político**
- **Fuente de violencia y refugiados que pueden irrumpir en países vecinos**

ENVITES EN EL JUEGO DE LA POLITICA ALIMENTARIA

Con el afán de asegurarse suministros futuros, varias naciones tratan calladamente de contratar, con países productores de cereales, derechos de explotación en su territorio. Citamos como ejemplos:

- **China** se propone alquilar tierras en **Australia, Brasil, Birmania (Myanmar), Rusia** y **Uganda**
- **Arabia Saudí** busca tierra de cultivo en **Egipto, Pakistán, Sudáfrica, Sudán, Tailandia, Turquía** y **Ucrania**
- **India:** compañías agrícolas buscan tierras de cultivo en **Paraguay** y **Uruguay**
- **Libia** busca alquilar 10.000 hectáreas en **Ucrania** a cambio del acceso a los campos de petróleo libios
- **Corea del Sur** quiere contratar tierras en **Madagascar, Rusia** y **Sudán**

granero del mundo. Si China acude al mercado mundial para importar grano, como ha hecho recientemente con semillas de soja, tendrá que comprarlo en EE.UU. Los consumidores estadounidenses se disputarían entonces con 1300 millones de chinos, cuya renta crece velozmente, la enorme cosecha de cereales de su país: un escenario de pesadilla. En tales circunstancias, EE.UU. podría inclinarse por restringir las exportaciones, como hiciera con los cereales y la soja en los años setenta ante el alza de precios nacionales. Pero esto no es posible con China. Más de un billón de dólares están en manos de inversores chinos, que en varias ocasiones han sido los primeros compradores internacionales de Títulos del Tesoro de EE.UU. emitidos para financiar el déficit fiscal. Les guste o no, los consumidores estadounidenses compartirán con los chinos sus existencias de grano, por mucho que suban los precios.

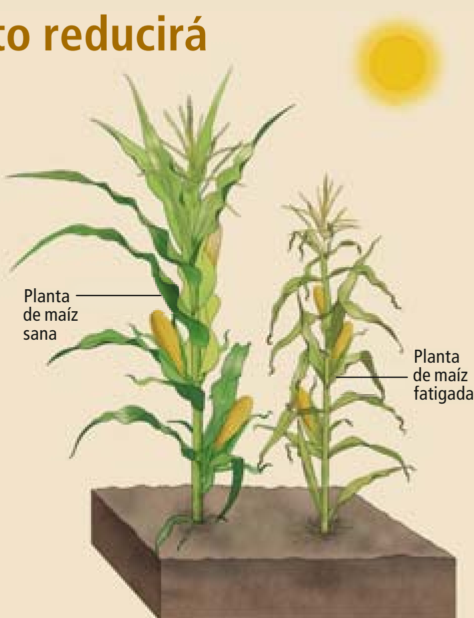
Plan B: la única opción

Para aliviar la escasez de víveres actual deberán invertirse las tendencias ambientales que la provocan. Ello requiere actuaciones de suma exigencia, radicalmente apartadas de las prácticas habituales (lo que en el Instituto de Políticas de la Tierra llamamos Plan A) hacia un Plan B que salve la civilización.

El Plan B, similar en urgencia y amplitud a la movilización de EE.UU. para la Segunda Guerra Mundial, comprende cuatro actuaciones: reducción de las emisiones de carbono en un 80 por ciento de 2006 a 2020; estabilización de la población mundial en ocho mil millones para 2040; erradicación de la pobreza, y regeneración de bosques, suelos y acuíferos.

El calentamiento reducirá las cosechas

La agricultura que tenemos hoy ha evolucionado conforme a un sistema climático que ha variado poco en sus 11.000 años de historia. Dado que la mayoría de los cultivos se han preparado para obtener un rendimiento máximo en esas condiciones estables, el calentamiento global que se avecina reducirá la cosecha, expresada en volumen recolectado por hectárea. Los agricultores ecológicos saben que por cada grado Celsius que aumenta la temperatura, las cosechas de trigo, arroz y maíz disminuyen en un 10 por ciento.



SAMUEL VELASCO 5W *Infographics*

Es posible reducir las emisiones de dióxido de carbono mediante un aumento sistemático de la eficiencia energética y una inversión masiva en el desarrollo de fuentes de energías renovables. Además, debe prohibirse la deforestación en todo el mundo, como ya lo han hecho varios países, y plantar miles de millones de árboles para capturar el carbono de la atmósfera. La transición de combustibles fósiles a fuentes de energías renovables se verá impulsada mediante la aplicación de impuestos a las emisiones de carbono, que se compensará con reducciones en el impuesto sobre la renta.

La estabilización de la población y la erradicación de la pobreza van de la mano. La clave para acelerar la evolución hacia familias menos numerosas reside en acabar con la pobreza, y también a la inversa. Un modo de conseguirlo es asegurar como mínimo una educación primaria para todos los niños, ellos y ellas. Otro camino es ofrecer una atención sanitaria elemental a la población rural, para que pueda confiar en que los hijos lleguen a la edad adulta. Las mujeres necesitan acceso a servicios de asistencia a la reproducción y a la planificación familiar.

El cuarto nivel de actuación, la restauración de los sistemas y recursos naturales del planeta, comporta una iniciativa mundial para detener la mengua de las capas freáticas mediante el aumento de la productividad del agua (la actividad útil que puede exprimirse de cada gota). Ello implica sistemas de riego más eficaces y cultivos que consuman menos agua. En ciertos países habría que cultivar (y consumir) más trigo y menos arroz, cereal que necesita mucha agua. Industrias y ciudades deberían reciclar continuamente el agua (algunas de ellas ya lo hacen).

Al propio tiempo, debemos emprender un esfuerzo global por conservar el suelo, tal como se hizo en el decenio de los treinta frente a la terrible sequía que por entonces asoló EE.UU. ("Dust Bowl"). Entre las medidas de conservación más importantes figuran la disposición en bancales, la plantación de árboles que protejan de la erosión del viento y la minimización del laboreo (el terreno no se ara ni se recogen los residuos de la cosecha) [*véase* "Agricultura sin labranza", por David R. Huggins y John P. Reganold; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2008].

No hay nada nuevo en los cuatro objetivos anteriores. Pese a estar relacionados, durante años se han abordado por separado. Se han creado instituciones enteras con ese fin, como el Banco Mundial para aliviar la pobreza. Al menos en uno de ellos, se ha logrado un avance notable en ciertas regiones: la distribución de

¿QUE DEBEMOS HACER?

El Plan B, la hoja de ruta que propone el autor para corregir los factores que amenazan nuestra civilización, comprende cuatro líneas básicas: reducción de las emisiones de carbono en un 80 por ciento de 2006 a 2020, estabilización de la población mundial en ocho mil millones allá por 2040, erradicación de la pobreza y regeneración de bosques, suelos y acuíferos. En el recuadro se destacan algunas de las principales actuaciones necesarias para alcanzar esos objetivos.



▲ Sustituir los combustibles fósiles por renovables para generar electricidad y calor.



◀ Plantar árboles para evitar inundaciones, conservar el suelo, capturar el carbono y detener la deforestación.



▲ Ofrecer con carácter universal atención sanitaria básica, asistencia a la reproducción y a la planificación familiar.



▲ Reciclar las aguas residuales para aumentar su productividad, como en esta planta de tratamiento en Orange County, California.

SONNY TUMBELAKA *Getty Images (plantación de árboles)*; GETTY IMAGES *(aerogeneradores)*; ANDREW CABALLERO-REYNOLDS *Getty Images (vacunación)*; MARY KNOX MERRILL *Getty Images (planta de tratamiento)*

servicios de planificación familiar ha conseguido disminuir la natalidad y tiende a estabilizar la población.

Muchos expertos consideraron positivos los cuatro objetivos del Plan B, promotores del desarrollo siempre que su coste no fuera excesivo. Otros vieron en ellos metas humanitarias, correctas en lo político y lo ético. Pero ahora aparece un tercer argumento, mucho más apremiante: el cumplimiento de estos objetivos tal vez resulte imprescindible para la subsistencia de nuestra civilización. El coste de este proyecto de supervivencia no ascendería a más de 200.000 millones de dólares anuales, la sexta parte del gasto militar actual en el mundo. Sin duda alguna, el Plan B constituye el nuevo presupuesto de seguridad global.

Tiempo: el recurso más escaso

Nuestro desafío no sólo consiste en llevar a cabo el Plan B, sino también en hacerlo con celeridad. El mundo es escenario de una carrera entre los intereses políticos y los naturales. ¿Podemos cerrar las plantas de combustión de carbón antes de que se funda la capa de hielo de Groenlandia y el mar inunde nuestras costas? ¿Será posible reducir las emisiones de carbono con prontitud suficiente para salvar los glaciares asiáticos? El agua que aportan estos glaciares durante la estación seca mantiene el caudal de los grandes ríos de India y China, que alimentan a millones de personas. ¿Podrá estabilizarse la población antes de que países como India, Pakistán y Yemen sucumban por carecer del agua necesaria para regar sus cultivos?

No exageramos la urgencia de nuestro llamamiento. No podemos perder ni un día. Por desgracia, no sabemos por cuánto tiempo podemos seguir alumbrando con carbón nuestras ciudades, antes de que sea demasiado tarde para salvar la capa de hielo de Groenlandia. La naturaleza pone límites, marca los tiempos. Pero los humanos no vemos el reloj.

Necesitamos desesperadamente un nuevo modo de pensar, otra estructura mental. Las ideas que nos metieron en este aprieto no nos sacarán de él. Cuando Elizabeth Kolbert, redactora del *New Yorker*, preguntó al gurú del sector energético Amory Lovins cómo podríamos salir de ese marco conceptual, Lovins respondió: “No hay marco que nos limite”.

Si la civilización ha de sobrevivir, la mente no puede encasillarse.

Bibliografía complementaria

OUTGROWING THE EARTH: THE FOOD SECURITY CHALLENGE IN AN AGE OF FALLING WATER TABLES AND RISING TEMPERATURES. Lester R. Brown. W. W. Norton, Earth Policy Institute, 2004.

COLLAPSE: HOW SOCIETIES CHOOSE TO FAIL OR SUCCEED. Jared Diamond. Penguin, 2005.

CLIMATE CHANGE 2007. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007.

PLAN B 3.0: MOBILIZING TO SAVE CIVILIZATION. Lester R. Brown. W. W. Norton, Earth Policy Institute, 2008.

AVANCES EN INGEN

Ali Khademhosseini, Joseph P. Vacanti y Robert Langer

Los pioneros en la construcción de tejidos artificiales describen los progresos del último decenio

Hace diez años, la última vez que dos de los autores (Langer y Vacanti) escribimos para esta revista sobre las perspectivas de la ingeniería de tejidos, la mera idea de "construir" carne viva mediante la aplicación de los principios de la ingeniería y la combinación de materiales inertes con células sonaba para muchos a fantasía. Sin embargo, la demanda de ese tipo de tejidos humanos trasplantables para sustituir, restablecer o mejorar la función de los órganos era, y sigue siendo, elevadísima. Hoy en día, unos 50 millones de estadounidenses viven gracias a las diversas terapias que utilizan órganos artificiales. En las naciones desarrolladas, una de cada cinco personas mayores de 65 años se beneficiará, durante lo que le quede de vida, de las técnicas de sustitución de órganos.

Las técnicas actuales para sustituir órganos (trasplantes y máquinas de diálisis renal, por ejemplo) han salvado muchas vidas, pero son soluciones imperfectas que suponen una pesada carga para el paciente. Los tejidos biológicos obtenidos por ingeniería se crean a la medida del paciente y son inmunocompatibles; pueden acarrear un cambio notable en la calidad de vida de los pacientes con órganos disfuncionales. Ofrecen también otras aplicaciones; por ejemplo, se utilizan a modo de "órganos en un chip" para medir la toxicidad de medicamentos en desarrollo.

Los tejidos artificiales adoptan múltiples formas: desde agregados o finas láminas de células hasta gruesas construcciones de tejido complejo o, en lo que viene a ser el reto supremo de la ingeniería, órganos enteros. Desde el momento en que describimos las dificultades que entrañaba la fabricación de estos tejidos implantables se han realizado progresos notables [*véase* "Organos artificiales", por Robert Langer y Joseph P. Vacanti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1995, e "Ingeniería de tejidos: urdimbre polimérica" por Robert Langer y Joseph P. Vacanti; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1999]. Productos como los sustitutos de la piel o del cartílago han ayudado ya a miles de pacientes. Tejidos artificiales como la vejiga urinaria, la córnea, los tubos bronquiales o los vasos sanguíneos se hallan en fase de ensayo clínico. Las investigaciones encaminadas a construir estructuras tisulares de mayor complejidad están arrojando resultados alentadores.

Aunque algunos de los obstáculos que describimos hace diez años siguen vigentes, a lo largo del intervalo transcurrido se han cosechado avances notables gracias a los nuevos conocimientos sobre el modo en que el cuerpo construye los tejidos, ya sea durante el desarrollo embrionario o la cicatrización de heridas. Asimismo, se han refinado las técnicas de ensamblaje de estructuras tisulares y depurado las propiedades químicas, biológicas y mecánicas de los materiales utilizados. La ingeniería tisular está alcanzando, pues, la madurez; los tejidos artificiales se han convertido en una alternativa cada vez más real para los tratamientos médicos.

Vascularización

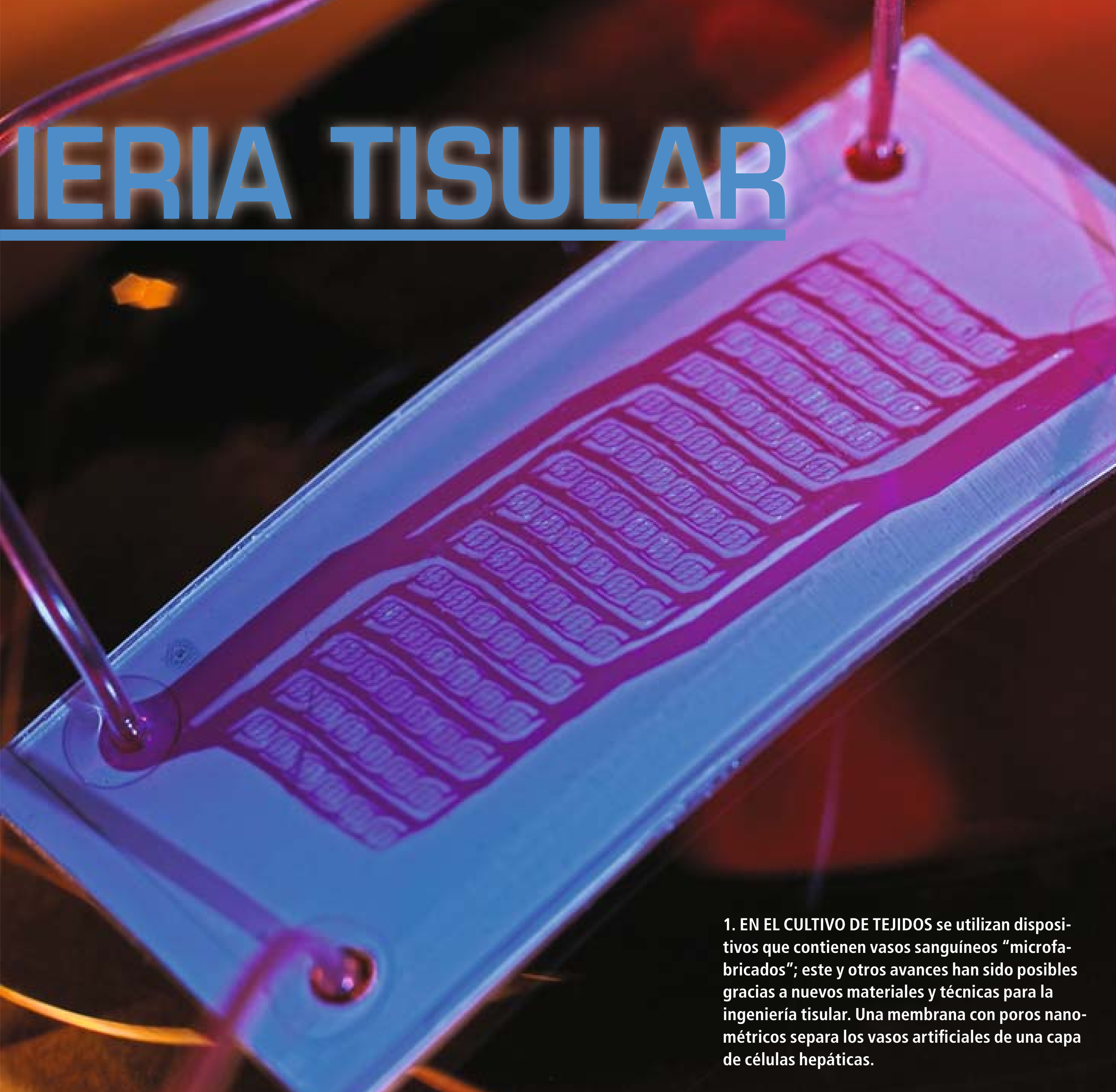
Una de las razones que hizo que tejidos como la piel o el cartílago fuesen de los primeros en ensayarse en humanos es que no necesitan una extensa vasculatura interna. La mayoría de los tejidos, en cambio, sí la necesitan. Las dificultades para proporcionar suministro sanguíneo siempre han limitado el tamaño de los tejidos creados por ingeniería. Por consiguiente, muchos científicos se están centrando en el diseño de vasos sanguíneos y en la incorporación de los mismos a tejidos artificiales.

Cualquier tejido de más de unos pocos cientos de micras de grosor necesita un sistema vascular, pues todas las células del tejido precisan hallarse cerca de los capilares para absorber el oxígeno y los nutrientes que se

CONCEPTOS BASICOS

- En el curso de los últimos diez años, se han intensificado los esfuerzos para construir tejidos artificiales. Se aplican ya en humanos algunos tejidos sencillos fabricados por ingeniería.
- Los avances han resultado de un mayor conocimiento del comportamiento celular y de los nuevos materiales de construcción.
- Varios productos de la ingeniería tisular están a punto de ser comercializados, pero deben antes someterse al complejo escrutinio regulador que se da a los materiales vivos.

"MICROFABRICATION OF THREE-DIMENSIONAL ENGINEERED SCAFFOLDS," POR JEFFREY T. BORENSTEIN, ELI J. WEINBERG, BRIAN K. ORRICK, CATHRYN SUNDBACK, MOHAMMAD R. KAAZEMPUR-MOFRAD Y JOSEPH P. VACANTI, EN *TISSUE ENGINEERING*, VOL. 13, N.º 8; 2007



1. EN EL CULTIVO DE TEJIDOS se utilizan dispositivos que contienen vasos sanguíneos "microfabricados"; este y otros avances han sido posibles gracias a nuevos materiales y técnicas para la ingeniería tisular. Una membrana con poros nanométricos separa los vasos artificiales de una capa de células hepáticas.

difunden constantemente a partir de esos vasos diminutos. Si se las priva de tales combustibles, las células no tardan en resentirse de forma irreparable.

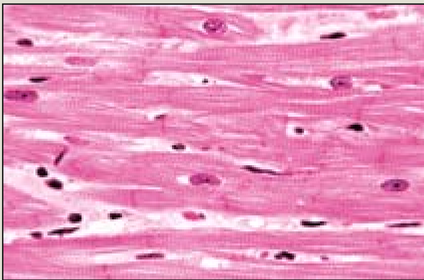
En los últimos años se han diseñado nuevas estrategias para la construcción de vasos sanguíneos, dentro y fuera de los tejidos. Las técnicas se basan en un mejor conocimiento de las necesidades ambientales de las células endoteliales (las que forman los capilares y el revestimiento de los vasos de mayor tamaño), así como en una mayor capacidad para esculpir materiales a escalas mínimas. Si se depositan células endoteliales sobre un lecho de material de sostén cuya superficie esté surcada por ranuras nanométricas, estas células se ven inducidas a formar un entramado de tubos capiliformes. Las ranuras imitan la textura del tejido corporal sobre el que se apoyan las células endoteliales durante la formación natural de los vasos sanguíneos, de modo que se les proporciona una señal ambiental clave.

La microfabricación, el conjunto de técnicas aplicadas para grabar los microchips que operan en ordenadores y teléfonos móviles, se ha empleado también en la fabricación de entramados capilares. Vacanti, junto con Jeffrey T. Borenstein, del Laboratorio Draper en Cambridge, ha generado en el interior de andamiajes poliméricos degradables unos microcanales que remedan los entramados de tejido capilar. En el interior de esos canales se cultivan células endoteliales para que formen vasos sanguíneos, al tiempo que actúan como una barrera natural que minimiza los efectos dañinos de la sangre sobre los materiales del soporte. Una opción alternativa consiste en utilizar una membrana que actúe a modo de filtro para separar, en el tejido que se está construyendo, los canales que transportan la sangre de las células funcionales.

Otro método para mantener la sangre y las células separadas, pero lo suficientemente cerca como para intercambiar diversas moléculas, consiste en introducirlas en el interior de

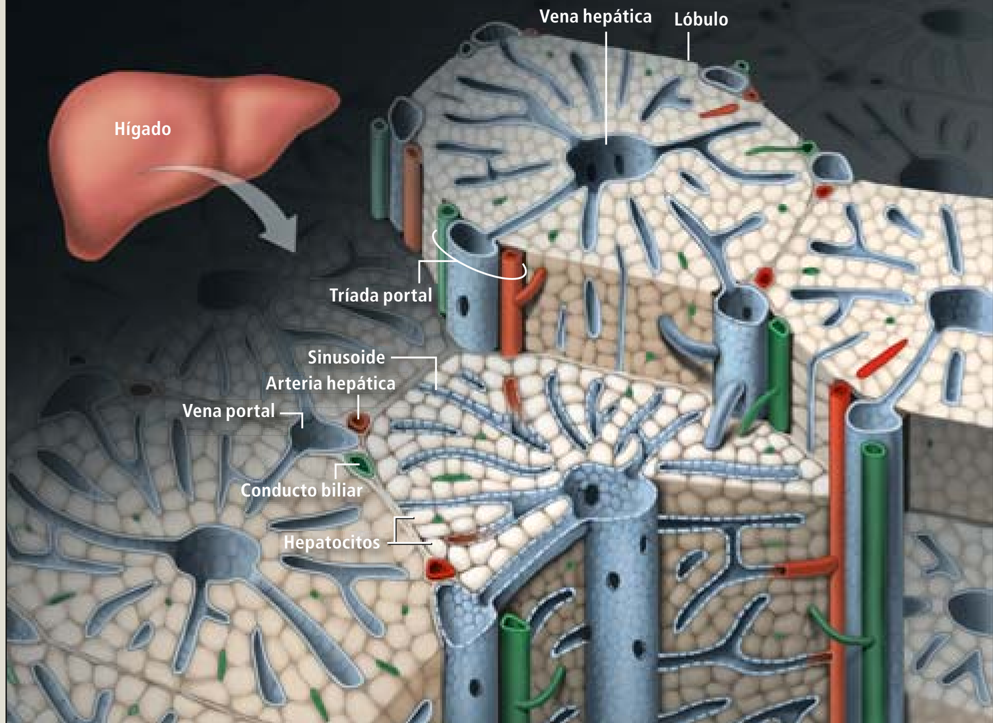
COPIAR LA ARQUITECTURA DE LA NATURALEZA

La salud y el funcionamiento de un tejido natural dependen, en buena medida, de su estructura interna. Los tejidos constan de multitud de tipos celulares que trabajan de forma conjunta para desempeñar las funciones de un órgano. El hígado (*derecha*) opera a modo de gigantesco filtro sanguíneo; el tejido cardiaco (*abajo*) forma un sistema de bombeo muscular. Puesto que las señales que intercambian las células con su entorno resultan cruciales para el desarrollo, mantenimiento y funcionamiento del tejido, el reto de los ingenieros consiste en remedar, mediante una mezcla de materiales artificiales y células vivas, la compleja organización natural del órgano.



El corazón está formado por células musculares largas y fibrosas, envueltas en capas de colágeno y transidas de vasos sanguíneos. El colágeno pone en conexión, por los extremos, haces musculares y conduce las señales neuronales que controlan sus contracciones. La forma y la orientación de las células musculares en el seno del tejido cardiaco resultan, pues, cruciales para mantener sus propiedades eléctricas y mecánicas.

El hígado está organizado en columnas más o menos hexagonales, los lóbulos. Cada lóbulo contiene un tejido esponjoso que emerge de forma radial en torno a una vena hepática central. En las esquinas de cada lóbulo se alojan las tríadas portales: formadas por la arteria hepática, un conducto biliar y la vena portal. La sangre procedente de la vena hepática y de la arteria hepática se filtra a través de las hileras de células de los lóbulos (hepatocitos), que se hallan intercaladas con células endoteliales que forman anchos capilares sanguíneos (sinusoides). La estructura repetitiva de los lóbulos hepáticos maximiza el suministro sanguíneo a los hepatocitos, que se encargan de extraer y degradar nutrientes y toxinas.



hidrogeles, materiales gelatinosos fabricados a partir de entramados de polímeros hidratados. Químicamente, los hidrogeles guardan semejanza con la matriz natural que rodea las células en el interior de los tejidos. Las células funcionales se encapsulan en el material y los canales que atraviesan el gel se revisten de células endoteliales para fabricar estructuras tisulares con protovasculatura.

Investigaciones realizadas por Laura Niklason, de la Universidad de Yale, y Langer han demostrado que pueden generarse vasos sanguíneos de mayor tamaño: basta con hacer crecer, en un biorreactor y en condiciones que imitan el latido del corazón, andamiajes sobre los que se han colocado células de la musculatura lisa y células endoteliales. Las arterias fabricadas en ese medio, que simula el flujo sanguíneo del organismo a través de los vasos sanguíneos, son robustas desde el punto de vista mecánico y siguen siendo funcionales después de trasplantarse a animales. Además de incorporarse a estructuras de mayor tamaño, los tubos fabricados por ingeniería pueden utilizarse a modo de injertos para la cirugía de derivación (bypass) en pacientes con ateroesclerosis.

Aunque la capacidad para fabricar fuera del organismo estructuras capilares o vasos sanguíneos de mayor tamaño constituye un avance notable, si se quiere que uno de esos implantes sea funcional y sobreviva deberá conectarse pronto al suministro sanguíneo del receptor. Estimular la vascularización en el organismo constituye, por tanto, un aspecto de parejo interés en la empresa. David Mooney, de la Universidad de Harvard, ha demostrado que la liberación controlada de factores de crecimiento por parte de esferas poliméricas o del propio material de sostén promueve la formación de vasos sanguíneos que penetran en el tejido implantado.

Pervasis Therapeutics, compañía a la que pertenecen Langer y Vacanti, está llevando a cabo ensayos clínicos avanzados en los que se aplica una variante de este principio para cicatrizar una herida vascular. Se trasplanta a una región próxima a la herida un andamiaje tridimensional que contiene células del músculo liso y células endoteliales; éstas proporcionan señales que estimulan el crecimiento y promueven la reconstrucción natural del vaso sanguíneo dañado.

INNERSPACE IMAGING *Photo Researchers, Inc. (células musculares del corazón)*; JEN CHRISTIANSEN *(diagrama del hígado)*

A pesar de esos avances, quedan todavía algunos retos que superar a la hora de fabricar tejidos vascularizados o injertos vasculares de cierto tamaño. El problema todavía no se ha resuelto. En un implante tisular, los nuevos vasos sanguíneos van creciendo y penetrando lentamente en su interior; muchas de las células del injerto mueren inmediatamente después del trasplante por falta de riego. Por este motivo, es probable que el trasplante de estructuras voluminosas requiera que éstas incluyan un sistema vascular prefabricado. Asimismo, esos vasos prefabricados pueden combinarse con la liberación controlada de factores de crecimiento que estimulen la vascularización del tejido trasplantado.

Puesto que la integración de la vasculatura prefabricada con la del huésped constituye también un factor crítico, debemos ahondar en el intercambio de señales que se produce entre las células del tejido receptor y las células implantadas para fomentar su interconexión. Esta necesidad de descifrar las señales que las células intercambian entre sí y con su entorno se extiende a otros aspectos de la construcción de un implante tisular; por ejemplo, la selección de las materias primas biológicas.

Células apropiadas

En la mayoría de los casos, lo ideal sería construir un tejido implantable a partir de las propias células de un paciente porque son compatibles con el sistema inmunitario del individuo en cuestión. Tales implantes deberían hacer frente a un menor número de obstáculos reguladores, ya que el material procedería del propio paciente. Pero resulta limitada la capacidad de las células normales para multiplicarse en cultivo, lo que dificulta la obtención de suficiente tejido para un implante. Las células madre adultas procedentes del paciente o de un donante son, en cierto modo, más prolíficas; además, se aíslan de diversas fuentes: sangre, huesos, músculo, vasos sanguíneos, piel, folículos pilosos, intestino, cerebro e hígado.

Sin embargo, las células madre adultas (que están presentes en los tejidos adultos y tienen la capacidad de generar toda una gama de tipos celulares característicos de su tejido nativo) son difíciles de identificar porque su aspecto apenas difiere del que presentan las células normales. Deben buscarse, por tanto, proteínas de superficie distintivas, que sirvan de marcadores moleculares para identificar a las células madre. La identificación de marcadores adicionales facilitaría el trabajo con células madre adultas en las aplicaciones de la ingeniería tisular. Afortunadamente, durante los últimos años se han realizado avances notables, entre ellos el desarrollo de métodos para aislar las células e inducirlas a proliferar y a diferenciarse para dar lugar a diversos tipos de tejido en cultivo.

Christopher Chen y Dennis Discher, ambos de la Universidad de Pennsylvania, han descubierto que las células madre mesenquimáticas, que suelen derivar del músculo, hueso o tejido adiposo, responden a los estímulos mecánicos procedentes de su entorno. Se diferencian para generar el tejido que presenta una rigidez más parecida a la del sustrato material sobre el que están creciendo. Otros investigadores han demostrado que las señales químicas procedentes del sustrato y del entorno son importantes a la hora de dirigir la diferenciación de las células madre adultas hacia un tipo de tejido u otro. Sin embargo, no hay acuerdo sobre si las células madre adultas tienen la capacidad de dar lugar a células que no pertenecen a su familia de tejidos (por ejemplo, que una célula madre mesenquimática genere células hepáticas).

A diferencia de lo que ocurre con las células madre adultas, las células madre embrionarias (CME) proliferan fácilmente en cultivo y pueden diferenciarse para dar lugar a todos los tipos celulares del organismo humano. Langer, junto con Shulamit Levenberg y sus colaboradores, del Instituto Technion-Israel de Tecnología en Haifa, han demostrado que puede conseguirse que las CME se diferencien para generar el tipo de tejido deseado sobre el mismo soporte utilizado para la ingeniería de tejidos. Ello sugiere la posibilidad de fabricar sobre el material de sostén, a partir de las CME que se están diferenciando, tejidos tridimensionales. Sin embargo, estas células plantean varios desafíos.

Dirigir la diferenciación uniforme de las CME hacia los tipos celulares deseados entraña todavía una gran dificultad. En un intento por remedar el complejo microentorno natural de las CME y optimizar su diferenciación, se están ensayando de forma simultánea multitud de condiciones para encontrar la combinación correcta de señales producidas por distintos materiales y matrices químicas. También están estudiando varias moléculas de tamaño reducido y proteínas señalizadoras para identificar los factores que controlan la "maternidad" (la capacidad de las células para dar lugar a una progenie diferenciada, al tiempo que ellas mismas permanecen indiferenciadas y en condiciones de producir más células nuevas a medida que se van necesitando).

Esos conocimientos podrían aplicarse también a la producción de células con las propiedades de las células embrionarias y sin algunos de sus inconvenientes. Además de las dificultades que acabamos de mencionar, no

YA SON UNA REALIDAD

Hay una serie de productos de la ingeniería tisular que se aplican para tratar a pacientes, en ensayos clínicos o en terapias aprobadas por la FDA: piel, cartílago y parches que aceleran la cicatrización de tejidos, entre otros.



PIEL: Epicel es un sustitutivo permanente de la epidermis; crece a partir de las células de la piel del paciente y está pensado para el tratamiento de quemaduras.



CARTILAGO: Carticel, uno de los primeros tratamientos con células comercializados, es una suspensión inyectable de condroicitos reparadores de cartílago, que proceden del paciente y que se han cultivado en presencia de factores de crecimiento.



PARCHES VENOSOS: Vascugel, actualmente en fase de ensayos clínicos, se fabrica a partir de células endoteliales procedentes de un donante; se ha diseñado para colocarse sobre un vaso sanguíneo dañado. Las células sanas del parche envían señales a las células del vaso dañado, que promueven la cicatrización y reducen la inflamación y el tamaño de la cicatriz.

CORTESIA DE GENZYME CORPORATION (*Epicel y Carticel*); CORTESIA DE JACK HARVEY *Pervasis Therapeutics, Inc.* (*Vascugel*)

se sabe todavía cómo predecir el comportamiento, en los pacientes, de las células madre trasplantadas. Las CME indiferenciadas forman tumores, lo que conlleva el riesgo de producir cáncer en el caso de que no todas las células consigan diferenciarse antes del trasplante. Además, los expertos se han venido enfrentando a los aspectos éticos asociados al uso de CME procedentes de embriones humanos; para ello han intentado producir células parecidas a las CME a partir de células no embrionarias.

En el último par de años se han realizado avances considerables en la producción de células similares a las CME a partir de tejido normal del organismo adulto, como las células de la piel. Estas células alteradas, las células madre pluripotenciales inducidas (CMPI), aparecen como una alternativa a las CME, puesto que ofrecen un recurso renovable para la ingeniería tisular.

En 2007, Shinya Yamanaka, a la sazón en la Universidad de Kioto, y James A. Thomson, de la Universidad de Wisconsin-Madison, demostraron que las células del tejido adulto pueden transformarse en un estado primitivo de las CMPI mediante la reactivación de una serie de rutas génicas que parecen hallarse en el origen de la "maternidad".

La reintroducción de tan sólo cuatro genes reguladores principales en células adultas dérmicas hizo que las células revertiesen a un primitivo tipo celular embrionario. Los primeros experimentos utilizaron un virus para insertar en las células esos genes, una técnica que podría resultar demasiado peligrosa si se aplicara a la obtención de tejidos destinados a pacientes.

En investigaciones más recientes se ha demostrado que se puede adaptar una técnica más segura que no utiliza virus para activar el mismo repertorio de "genes de la maternidad" y que incluso la activación de un gen regulador podría resultar suficiente. Debido al rápido progreso que ha experimentado este campo, los ingenieros de tejidos confían en que pronto las células de un paciente, dotadas con las propiedades de las CME, puedan convertirse en el material idóneo para la construcción de estructuras tisulares. Conforme se va experimentando con esos tipos celulares diversos, se refinan los métodos de fabricación.

Avances arquitectónicos

Hace un decenio, los expertos suponían que las células eran inteligentes: si se disponían los tipos celulares correctos uno cerca de otro, "sabrían" qué debían hacer para formar sus tejidos nativos. Se trata de una estrategia hasta cierto punto eficaz. Pero ahora disponemos de un conocimiento más hondo de la complejidad de las señales que intercambian las células entre sí y con su entorno, durante el desarrollo de órganos y tejidos y durante su funcionamiento normal. Y sabemos de la importancia de suministrar un entorno a la medida del tejido que fabricamos.

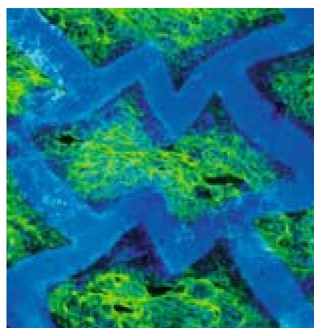
Cada tejido de nuestro organismo desempeña tareas específicas, que los recambios fabricados por ingeniería deben remedar. Nos estamos percatando de que, a la hora de crear tejidos que lleven a cabo las funciones encomendadas, resulta crucial imitar lo mejor posible la biología subyacente del tejido en cuestión. En los órganos más complejos, los tipos celulares trabajan coordinados. En el hígado, por ejemplo, las células se encargan de la destoxificación y la descomposición de los nutrientes. Por tanto, para reproducir en el tejido artificial la funcionalidad deseada deben conservarse la microarquitectura del tejido natural así como las posiciones relativas de las células entre sí.

En sus comienzos, la ingeniería tisular utilizaba andamiajes construidos a partir de materiales diversos; con ello se pretendía remedar la forma tridimensional del tejido y reproducir vagamente la organización espacial de las células. En los últimos años, una serie de avances han incrementado el nivel de complejidad de los tejidos artificiales y han conseguido reproducir con mayor fidelidad el entorno tisular. Se han fabricado andamiajes mediante la eliminación de todas las células de los tejidos naturales, excepto las fibras conectivas. Esos armazones sirven para hacer crecer en ellos tejidos que reproducen un porcentaje notable de las funciones del tejido original.

En un estudio impresionante, se eliminaron las células de los tejidos de sostén del corazón de un roedor y se impregnaron con células cardiacas y células endoteliales; se obtuvieron fibras musculares cardiacas y estructuras vasculares que crecieron hasta formar un corazón que latía.

Se aplican también diversas técnicas "impresión" para ubicar las células de una manera precisa. Mediante la modificación de las impresoras de chorro de tinta, los ingenieros depositan en lugares determinados las células o el material de sostén para generar tejidos o soportes sobre los que implantar células. Imitar la topografía del tejido natural ayuda también a orientar las células.

Otra técnica que se ha tomado prestada del mundo de la ingeniería, el *electrospinning*, genera andamiajes que reproducen la textura de la matriz tisular natural. Se hacen girar fibras poliméricas muy finas para formar soportes parecidos a una tela de araña; éstos proporcionan a las células un entorno tridimensional más natural, en el que pueden manipularse



2. ANDAMIAJES EN FORMA DE PANAL (*azul*) dirigen el alineamiento de las células cardiacas de rata, cuyas fibras contráctiles aparecen teñidas (*verde*). Durante la vida de una persona, el músculo cardiaco debe contraerse y dilatarse, sin cansarse, alrededor de 300 millones de veces. Para reproducir las señales mecánicas que mejoran la capacidad contráctil de las células, Lisa E. Freed y George C. Engelmayr Jr., ambos del Instituto de Tecnología de Massachusetts, diseñaron un andamiaje con una flexibilidad similar a la de un acordeón. Utilizaron un láser para cortar los poros en forma de panal en "biocaucho", un material elástico desarrollado por Yadong Wang y Robert Langer.

con precisión las características químicas y mecánicas de los materiales poliméricos. David Kaplan, de la Universidad Tufts, ha diseñado, a partir de materiales de seda, soportes similares con aspecto de tela de araña para generar ligamentos y tejidos óseos.

Las propiedades biológicas, químicas y mecánicas de los hidrogeles pueden manipularse fácilmente. Sobre esa base, los geles están resultando de gran utilidad para dar soporte a las células y para retenerlas en su interior, al tiempo que mejoran la función de los tejidos resultantes.

Los hidrogeles que contienen células vivas pueden "imprimirse" o hacer que adopten otros tipos de ordenamientos o de apilamientos para que adopten la estructura tisular correcta. Uno de los autores (Khademhosseini) ha demostrado que los agregados celulares incorporados a los hidrogeles pueden moldearse para que adopten cualquier tipo de forma complementaria, recuperarlos y hacer que se autoorganicen formando patrones complejos de mayor tamaño. Podría recurrirse a esta técnica para reproducir la organización natural de las células en un tejido como el hígado, que consta de estructuras hexagonales que contienen, en torno a un vaso sanguíneo central, células filtradoras de toxinas.

Algunos geles están diseñados para que sus polímeros se unan entre sí en respuesta a la luz ultravioleta, lo que permite esculpir estructuras con la forma deseada y solidificarlas luego mediante la exposición total o parcial a la luz. Kristi Anseth, de la Universidad de Colorado en Boulder, y Jennifer Elisseeff, de la Universidad Johns Hopkins, han generado tejido cartilaginoso y óseo utilizando estos hidrogeles, que forman entrecruzamientos al ser iluminados.

Podemos también impregnar los geles con moléculas señalizadoras para promover el crecimiento o la diferenciación de tejidos. Samuel Stupp, de la Universidad del Noroeste, ha descubierto que las células madre neurales se diferencian en neuronas en el interior de un hidrogel al que se le han incorporado pequeñas proteínas que actúan a modo de señales del entorno que regulan el comportamiento de las células. Helen M. Blau, de la Universidad de Stanford, ha utilizado hidrogeles que contienen componentes de la matriz extracelular para controlar y estudiar las propiedades de células madre individuales.

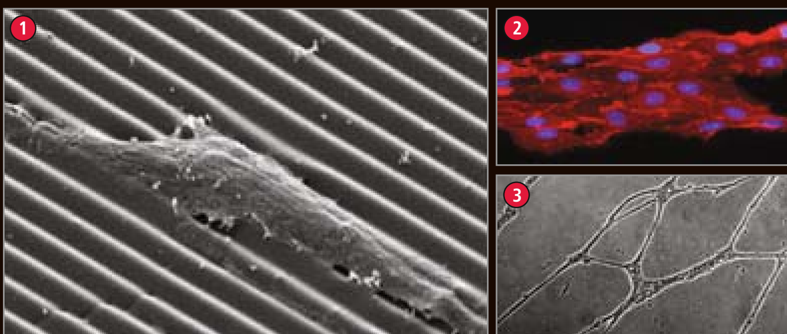
Por último, también se ha recurrido a la nanotecnia para generar láminas de células trasplantables. Teruo Okano, de la Universidad Femenina de Medicina en Tokio, ha fabricado superficies recubiertas con un polímero termosensible que se hincha conforme

Fabricación de vasos sanguíneos

Sin el aporte de oxígeno y nutrientes a través de la sangre a las células, los tejidos mueren pronto por inanición. Un tejido artificial que tenga un espesor mayor de unas pocas capas de células necesita, por tanto, una vasculatura integrada. En los tejidos naturales, las células endoteliales forman los diminutos capilares y el revestimiento interno de vasos de mayor tamaño, pero conseguir que las células endoteliales construyan un entramado vascular que penetre en el interior de un tejido artificial supone un reto colosal. Las técnicas de microfabricación y nanofabricación (que se han tomado prestadas de la industria de los semiconductores) permiten controlar el comportamiento de las células y su ubicación con una precisión nunca antes conseguida.

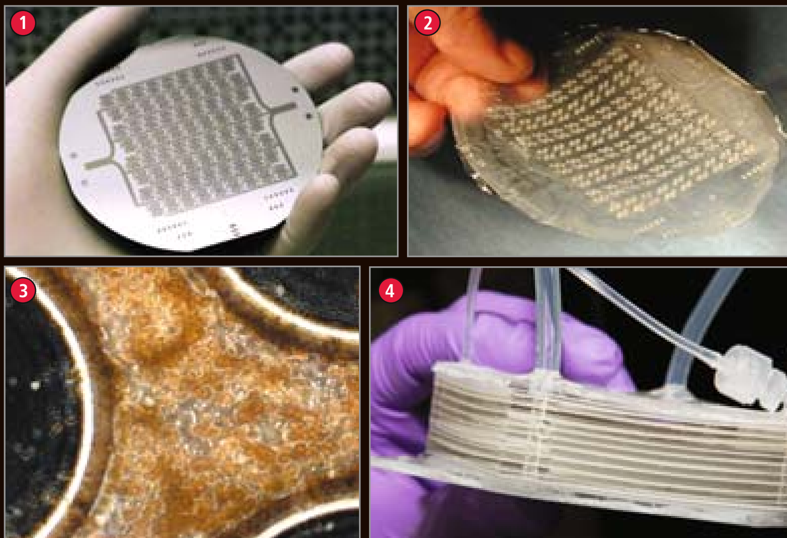
SUPERFICIE NANOMOLDEADA

Las células responden a las señales químicas procedentes de sus vecinas o de la matriz extracelular circundante, que les sirve de soporte. Responden también a los estímulos mecánicos que suponen la forma y la textura de la superficie sobre la que están creciendo. Surcos con una profundidad de 600 nanómetros y una anchura de 1200 nanómetros remedan la topografía natural de la matriz de determinados tejidos y proporcionan a las células endoteliales las señales mecánicas que afectan a la forma celular y a su velocidad de migración y proliferación (*1*). Tras crecer durante seis días en la superficie nanomoldeada, las células se multiplican y se alinean por sí mismas en la dirección que marcan los surcos (*2*) y crean un entramado de tubos similares a los capilares (*3*).



MICROFABRICACION

Para controlar la estructura vascular en el interior de un dispositivo implantable de asistencia hepática, se imprime sobre un molde de silicona la disposición de vasos sanguíneos deseada (*1*). A continuación, se siembra con células endoteliales un andamiaje hecho de un polímero biocompatible y con la forma impuesta por el molde de silicona; se recubren así las paredes de los vasos artificiales (*2*). Se cultivan células hepáticas en los canales de andamiajes idénticos (*3*). Se apilan de forma alternada láminas de material de soporte que contienen "vasos sanguíneos" y láminas que contienen cultivos de células hepáticas; se coloca entre cada lámina una membrana con poros nanométricos, de manera que las células hepáticas se hallan siempre cerca del suministro sanguíneo (*4*). El dispositivo con tejidos híbridos resultante, que ya se ha ensayado en animales, se ha diseñado para que sirva de puente a los pacientes en lista de espera para un trasplante de hígado.



CORTESIA DE DRAPER LABORATORY (*1, arriba, y 1 y 4, abajo*); "ENHANCEMENT OF IN VITRO CAPILLARY TUBE FORMATION BY SUBSTRATE NANOTOPOGRAPHY," POR C. J. BETTINGER, Z. ZHANG, S. GERECHT, J. T. BORENSTEIN Y R. LANGER, EN *ADVANCED MATERIALS*, VOL. 20; 2008 (*2 y 3, arriba*); "MICROSCALE TECHNOLOGIES FOR TISSUE ENGINEERING AND BIOLOGY," POR A. KHADEMHOSSEINI, R. LANGER, J. T. BORENSTEIN Y J. P. VACANTI, EN *PNAS*, VOL. 103, N.º 8; 21 DE FEBRERO DE 2006. © ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS, EE.UU. (*2, abajo*); "THREE-DIMENSIONAL MICROFLUIDIC TISSUE-ENGINEERING SCAFFOLDS USING A FLEXIBLE BIODEGRADABLE POLYMER," POR C. J. BETTINGER, E. J. WEINBERG, K. M. KULIG, J. P. VACANTI, Y. WANG, J. T. BORENSTEIN Y R. LANGER, EN *ADVANCED MATERIALS*, VOL. 18; 2006 (*3, abajo*)

la temperatura desciende de 37 a 20 grados Celsius. En primer lugar, se induce a las células a formar una monocapa sobre las superficies creadas por nanoingeniería; se reduce luego la temperatura para que el sustrato se hinche y la lámina celular se desprenda intacta. A continuación, estas láminas celulares, que contienen el conjunto correcto de moléculas de la matriz que han secretado las células, se apilan o enrollan para construir estructuras tisulares de mayor tamaño.

Aunque esos avances han supuesto una mejora notable en los tipos y en la variedad de andamiajes que se pueden generar, quedan todavía algunos retos pendientes. Una de las dificultades radica en la falta de conocimiento sobre la concentración y las combinaciones de factores de crecimiento y moléculas extracelulares que están presentes en diversos tejidos durante determinadas etapas del desarrollo o de la cicatrización de heridas. Se necesita un mayor conocimiento de esos parámetros para fabricar tejidos que remeden el desarrollo del organismo o la cicatrización de heridas. Por tanto, los ingenieros tisulares están mirando hacia otras áreas de conocimiento, incluido el estudio sobre las interacciones entre genes y proteínas que tienen lugar durante el desarrollo de tejidos y la cicatrización. La incorporación de esos hallazgos a los sistemas de cultivo avanzados permite un mayor control de las respuestas celulares fuera del organismo, pero habrá que avanzar mucho más.

Alcanzando la madurez

A pesar de los retos que hemos descrito, los tejidos biológicos artificiales han dejado de ser una fantasía futurista. Ya se están utilizando en la práctica clínica tejidos sencillos fabricados por ingeniería. Este método para restaurar o sustituir la función biológica está destinado a convertirse en una terapia viable para millones de pacientes necesitados. En 2008, varios productos derivados de la ingeniería tisular generaron unas ventas anuales de casi 1500 millones de dólares.

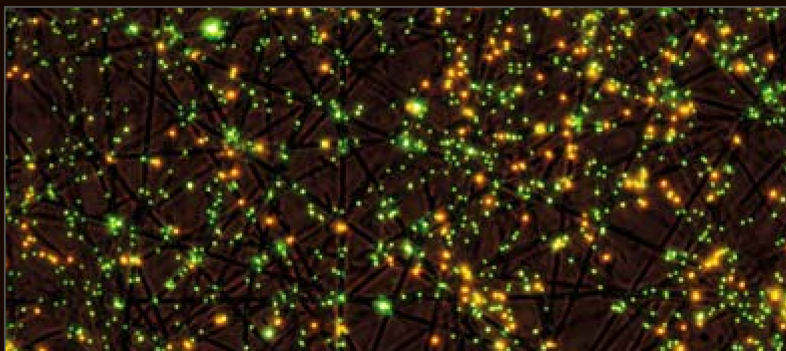
Las cifras nos parecerán más impresionantes todavía si recordamos los reveses que sufrió el sector poco después de que publicásemos el último artículo para esta revista, donde aludimos a las prometedoras perspectivas de la ingeniería tisular. A finales del decenio de los noventa y comienzos de éste, había mucho entusiasmo y ganas de invertir; pero con el estallido de la burbuja financiera de Internet, disminuyó la financiación para las empresas biotecnológicas emergentes. Compañías con productos basados en la ingeniería de tejidos ya aprobados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) tuvieron que

Materiales de construcción avanzados

Los ingenieros quieren reproducir la estructura interna de un tejido natural tan fielmente como sea posible porque las células dependen de los estímulos ambientales para mantenerse y desempeñar sus tareas. Nuevas técnicas y materiales ofrecen un control más preciso y métodos más rápidos para crear estructuras celulares diseñadas para convertirse en un implante funcional.

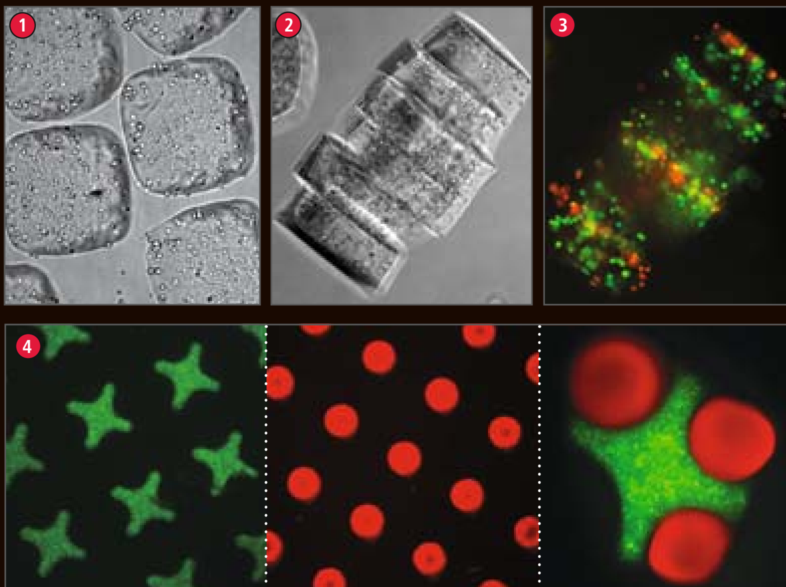
ELECTROSPINNING

Una técnica para la fabricación de fibras ultrafinas (con un diámetro nanométrico o micrométrico) a partir de líquidos y otras sustancias se ha adaptado para producir andamiajes celulares con forma de rejilla. Ese tipo de superficie maximiza el espacio disponible para las células y los contactos que establecen las células con el material de soporte (imita la textura de la matriz extracelular y se impregna con sustancias que promueven el crecimiento). Ese tipo de andamiaje se ha fabricado a partir de seda y otros polímeros. Se incorporan células vivas en el interior de las fibras (puntos verdes) para asegurar que se hallen distribuidas regularmente por todo el andamiaje.



ENSAMBLAJE DE HIDROGELES

La inclusión de células vivas en el interior de hidrogeles poliméricos permite crear ordenamientos celulares que remedan la estructura natural del tejido. Las moléculas de polímero se unen entre sí en respuesta a la luz ultravioleta, haciendo que los geles se endurezcan lo suficiente como para poder darles la forma de bloques de construcción y ensamblarlos para generar estructuras ordenadas de mayor tamaño. Un método para producir bloques de hidrogeles con células en su interior y que se puedan autoensamblar comienza con un gel formado por materiales hidrofílicos (que muestran afinidad por el agua), repleto de células vivas y al que se le ha dado forma de cubo mediante fotolitografía (*1*). Cuando se suspenden los bloques en aceite y se agitan, las unidades hidrofílicas se atraen entre sí, formando agregados de mayor tamaño que se estabilizan mediante una segunda exposición a la luz, con lo que se crean nuevos entrecruzamientos (*2*). Las células (*verde*) siguen siendo viables en el interior de los bloques (*3*). Mediante bloques que contienen un colorante se ilustra cómo puede darse forma a hidrogeles que albergan distintos tipos de células para que se autoensamblen y generen estructuras de mayor tamaño, que imiten las estructuras naturales de tejidos como, por ejemplo, los sinusoides hepáticos (*4*).



CORTESIA DE SUWAN JAYASINGHE (*electrospinning*); "DIRECTED ASSEMBLY OF CELL-LADEN MICROGELS FOR FABRICATION OF 3D TISSUE CONSTRUCTS," DE YANAN DU, EDWARD LO, SHAMSHER ALI Y ALI KHADEMHOSSEINI, EN *PNAS*, VOL. 105, N.º 28; 15 DE JULIO DE 2008. © ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS, EE.UU. (*1–4*)

EN LISTA DE ESPERA

Al menos 70 compañías han desarrollado o están desarrollando productos tisulares implantables, es decir, que sustituyen o restablecen la función de los tejidos humanos mediante la combinación de células vivas con técnicas y materiales tomados de la ingeniería. En muchos de los productos comercialmente más avanzados, esas células son suministradas por el mismo receptor del implante. Entre esos productos podemos mencionar toda una serie de materiales de soporte libres de células y diseñados para fomentar la regeneración de los tejidos del paciente, así como los injertos celulares y los agregados celulares. Entre los tejidos enteros se incluyen grandes vasos sanguíneos fabricados por ingeniería, otros implantes que sustituyen por completo el tejido original del paciente y multitud de tipos de piel compleja, que se utiliza para realizar injertos en el paciente y, cada vez con mayor frecuencia, para ensayar productos químicos sin utilizar animales.

TIPO DE IMPLANTE	COMPAÑIAS Y ETAPA DE DESARROLLO EN QUE SE ENCUENTRA EL PRODUCTO		
	Fase preclínica	**Ensayos clínicos**	**Aprobados**
Andamiajes libres de células (Materiales de soporte implantables o inyectables y componentes de la matriz del tejido)	3DM, Cardio, Cytomatrix, RegenTec, Regentis Biomaterials, Tepha	Celltrix, Forticell Bioscience, Kuros Biosurgery, Serica Technologies	Advanced Biopolymers, Baxter, Cook Biotech, Fidia, Imedex Biomateriaux, Integra, Johnson & Johnson, Lifecell, Medtronic, Orthovita, Pioneer Surgical Technology, ReGen Biologics, TEI Biosciences, Tissue Regeneration Therapeutics
Productos basados en células (Células encapsuladas, agregados o láminas con un solo tipo de células, dispositivos de ayuda para los órganos)	BioEngine, Cerco Medical, GeneGrafts, MicroIslet	ArBlast, Excorp, HepaLife Technologies, Isolagen, LCT, Neurotech, Novocell, NsGene, Pervasis Therapeutics, TiGenix, Vital Therapies	Advanced BioHealing, Arthro Kinetics, Biotissue Technology, Cell Matrix, CellTran, Genzyme, Hybrid Organ, Interface Biotech, Organogenesis, SEWON Cellontech, Tetec, Vasotissue Technologies
Tejidos enteros (Vasos sanguíneos, cartílago, hueso, vejiga urinaria, músculo cardiaco, piel compleja)	Bio Nova, Humacyte	BioMimetic Therapeutics, Cytograft, Educell, Histogenics, Intercytex, ISTO, Tengion, Theregen	Euroderm, Japan Tissue Engineering, Karocell Tissue Engineering, MatTek, Skin Ethic Laboratories

reestructurar sus modelos de negocio y retrasar la comercialización de sus productos.

Puesto que los tejidos artificiales se fabrican a partir de células, sustancias biológicamente activas y materiales de soporte de origen no biológico, las estructuras construidas deben someterse a análisis rigurosos por parte de la FDA, lo que supone mucho dinero y tiempo. La falta de financiación hizo que fuese más difícil para las empresas llevar a cabo ensayos clínicos amplios. Paradójicamente, el retraso en la comercialización de algunos productos derivados de la ingeniería tisular tuvo su lado positivo: concedió tiempo para que la ciencia madurase y para que las estrategias de negocio se adaptasen.

Todavía hay margen para mejorar. La obtención de la aprobación por parte de la FDA sigue siendo uno de los principales obstáculos, en parte porque las células obtenidas de personas distintas pueden no comportarse de la misma forma y porque los receptores pueden desarrollar diversas respuestas ante un mismo tipo de implante. Esta impredecibilidad puede hacer que resulte difícil para la FDA determinar si una estructura concreta creada por ingeniería es segura y eficaz. Por tanto, es importante investigar más para medir y comprender las diferencias entre individuos y tenerlas en cuenta en los ensayos clínicos que estudian productos de la ingeniería tisular. Los futuros modelos de negocio deben incluir los inmensos costes que irán asociados a ese trabajo.

Con el bagaje de los nuevos conocimientos sobre desarrollo de tejidos y cicatrización de heridas, los ingenieros de tejidos se afanan por crear productos de segunda generación que, desde el punto de vista mecánico, químico y funcional, se parezcan más que nunca a sus equivalentes biológicos. Incluso en el clima actual de restricciones económicas, esperamos que las investigaciones en nanotecnia, biología de las células madre, biología de sistemas e ingeniería de tejidos converjan pronto y aporten nuevas ideas que permitan refinar los órganos artificiales que tanta gente necesita.

Los autores

Ali Khademhosseini es profesor en la División de Ciencias de la Salud y Tecnología de Harvard-MIT y en la facultad de medicina de Harvard. Centra su investigación en el desarrollo de microtécnicas y nanotécnicas para controlar el comportamiento celular en la ingeniería tisular y la administración de fármacos. **Joseph P. Vacanti** es cirujano jefe del Hospital General Infantil de Massachusetts, catedrático en la facultad de medicina de Harvard y subdirector del Centro de Medicina Regenerativa del Hospital General de Massachusetts. **Robert Langer** es profesor en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y el ingeniero más citado de la historia. Langer y Vacanti han sido pioneros de la ingeniería tisular.

Bibliografía complementaria

BRINGING SAFE AND EFFECTIVE CELL THERAPIES TO THE BEDSIDE. Robert A. Preti en *Nature Biotechnology*, vol. 23, n.º 7, págs. 801-804; julio, 2005.

MICROSCALE TECHNOLOGIES FOR TISSUE ENGINEERING AND BIOLOGY. Ali Khademhosseini, Robert Langer, Jeffrey Borenstein y Joseph P. Vacanti en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 103, n.º 8, págs. 2480-2487; 21 de febrero, 2006.

ENGINEERING COMPLEX TISSUES. Antonios G. Mikos y col. en *Tissue Engineering*, vol. 12, n.º 12, págs. 3307-3339; diciembre, 2006.

GREAT EXPECTATIONS: PRIVATE SECTOR ACTIVITY IN TISSUE ENGINEERING, REGENERATIVE MEDICINE, AND STEM CELL THERAPEUTICS. Michael J. Lysaght y col. en *Tissue Engineering*, parte A, vol. 14, n.º 2, págs. 305-315; febrero, 2008.

Rayos en casa

Puestos en contacto, materiales distintos se cargan de electricidad estática. Este fenómeno ocasiona descargas eléctricas intempestivas y desagradables, aunque pueden resultar útiles

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

Acaba de llegar su amigo. Cuando le besa, sufre una pequeña descarga, antes incluso de que los labios rocen su piel. No se entusiasme, esa pequeña chispa no es cosa del amor. Se trata de la manifestación de la electricidad estática que se produce por contacto o por frotamiento. El fenómeno se conoce desde el siglo VI antes de nuestra era: los griegos habían observado que el ámbar frotado con seda atraía pequeños trozos de paja.

La electrización por contacto no se reduce a sensaciones desagradables. Recibe también importantes aplicaciones: por botón de muestra, en el proceso de fotocopiado. De aquel pequeño efecto de los griegos nació el mundo moderno gobernado por el hada electricidad.

¿En qué consiste el fenómeno? Cuando caminamos sobre una moqueta con zapatos de crepé, a cada paso recogemos cargas eléctricas; dejamos tras nosotros una estela de huellas cargadas. La carga total que acumulamos en el cuerpo es, por lo general, muy débil, del orden de 10^{-7} coulomb, o sea, un billón de cargas elementales. Sin embargo, basta para inducir en nuestro cuerpo un potencial eléctrico comprendido entre 1500 volt, en tiempo húmedo, y 35.000 volt, en tiempo seco.

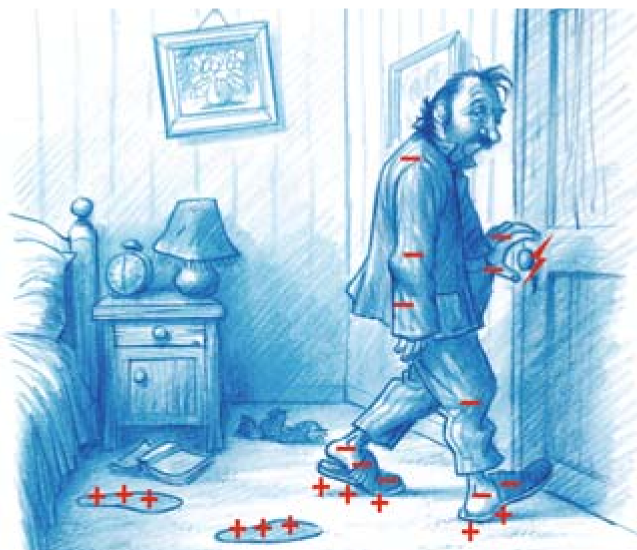
En ocasiones, cuando una parte de nuestro cuerpo (una mano, por ejemplo) se acerca a un objeto conductor, salta una chispa. En el corto espacio que separa el conductor de la mano, el campo eléctrico ha sobrepasado la tensión de ruptura del aire, 3000 volt por milímetro. Las moléculas del aire se ionizan y los iones se desplazan bajo la acción del campo, creándose una corriente eléctrica. Esta puede ser de varios ampère durante algunas milmillonésimas de segundo. Aunque la energía liberada es escasa y no peligrosa para nosotros —sí desagradable—, puede resultar fatal para los componentes electrónicos.

Una cuestión de afinidad

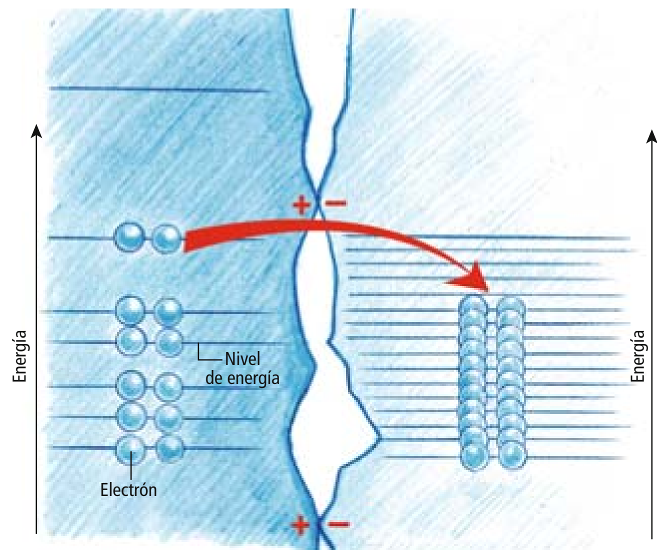
El fenómeno responsable de esa acumulación de carga se llama triboelectricidad, del griego *tribein*, "frotar". ¿A qué se debe? Los átomos son neutros, con la carga positiva del núcleo compensada por la carga negativa del séquito de electrones; sin embargo, según su naturaleza, poseen una menor o mayor afinidad por los electrones. El oxígeno capta electrones fácilmente; el calcio, tiende a cederlos. A escala microscópica, los defectos, las impurezas y las peculiaridades de la estructura de los materiales complican la situación. Con todo, las diferencias de afinidad electrónica persisten y la transferencia de cargas entre dos materiales en contacto se convierte en un fenómeno universal.

Frotando unas con otras sustancias, pueden clasificarse los materiales en función de su afinidad creciente por los electrones: cuero, vidrio, mica, lana, cuarzo, ámbar, caucho, celuloide, etcétera. Estas tablas no deben tomarse al pie de la letra, pues dependen del estado de las superficies, la humedad y el frotamiento.

El frotamiento no es necesario para que se produzca transferencia de carga, basta con el simple contacto. Cuando retiramos la envoltura protectora de un libro o de una caja, comprobamos que ésta es fuertemente atraída por los ma-

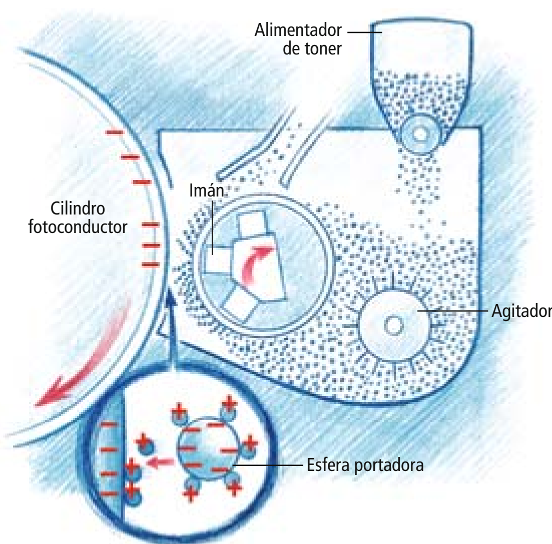


1. **Al caminar, el mero contacto con el suelo supone una transferencia de cargas eléctricas entre aquél y nuestro cuerpo. La carga total acumulada basta muchas veces para producir una pequeña chispa entre nuestro cuerpo y un objeto conductor, si apenas media distancia entre ambos.**



2. **En dos materiales distintos, los niveles de energía de los electrones son diferentes. Dado que en los sistemas físicos la energía tiende a ser mínima, el contacto entre dos materiales induce un flujo de electrones del uno al otro, donde la energía electrónica es inferior.**

BRUNO VACARO



3. En las fotocopiadoras, las micropartículas del tóner se agitan junto con bolitas, esferas de tamaño reducido. La agitación electriza por contacto las partículas, que luego se adhieren entre sí. Los conjuntos esfera-micropartícula son atraídos por imanes hacia el contacto con la superficie fotoconductora de un cilindro (*izquierda*), donde la imagen del documento que debe copiarse se halla impresa mediante cargas eléctricas de signo contrario al de las micropartículas de tóner. Estas se fijan entonces a la superficie del cilindro y ennegrecen ésta en los lugares previamente dotados de carga.

BRUNO VACARO

teriales circundantes: ello se debe a que se cargó espontáneamente mientras estuvo en contacto íntimo con otra superficie, sin que mediara fricción; el campo eléctrico resultante explica la adherencia.

En general, la carga así adquirida sigue siendo pequeña: en razón de las microrrugosidades, el área real de contacto entre dos materiales es muy reducida respecto a la superficie aparente. Podemos aumentarla si oprimimos fuertemente un cuerpo contra el otro, a la vez que los frotamos; ello modifica y renueva sin parar los puntos de contacto, por donde se transfieren las cargas. La superficie real de contacto crece entonces de forma notable, lo que aumenta otro tanto la carga acumulada.

Durante el contacto, los electrones, más móviles que los iones, son los que se desplazan. Para ceder energía, abandonan un cuerpo por otro afín. Sin embargo, en el transcurso de la transferencia, la diferencia de cargas entre las dos superficies crea una diferencia de potencial creciente, que se opone al movimiento de las cargas y acaba por compensar la diferencia de energía inicial: la transferencia cesa entonces por sí misma.

Durante la electrización, las cargas se concentran en las proximidades de los puntos de contacto. Tras separarse los materiales, las cargas pueden repartirse por todo el objeto cuando éste o su superficie son conductores de la electricidad. En un material aislante, en cambio, las cargas permanecen allá donde han aparecido. La carga depositada vale entonces de 10^{-11} a 10^{-9} coulomb por milímetro cuadrado. Como el número de átomos contenidos en un milímetro cuadrado es del orden de 10 billones, resulta como mucho una carga elemental por cada 1000 átomos.

¿Para qué sirve la electrización por contacto? Para cargar partículas incontrolables por métodos mecánicos. El fotocopiado ofrece un primer ejemplo. La tinta (tóner) de las fotocopiadoras es un polvo de minúsculas partículas poliméricas (diez micras de diámetro) pigmentadas, que se cargan eléctricamente por agitación mecánica junto con microesferas. Las fuerzas electrostáticas mantienen las partículas del tóner en contacto con esas esferas portadoras y las fijan luego en la superficie cargada del material fotoconductor, que lleva impreso electrostáticamente el documento que queremos reproducir.

Fotocopias o sondas espaciales

Hallamos otra aplicación de la electrización por contacto en el filtrado de los humos industriales, cuyo hollín atasca los microfiltros. Cuando se hacen pasar los productos de combustión entre dos placas poco separadas, las partículas de hollín chocan con ellas. Y así se cargan, lo que permite capturarlas mediante un campo eléctrico, e incluso clasificarlas (el hollín de carbono y el polvo mineral se cargan con signos contrarios).

Por fin, la triboelectricidad plantea un reto para las futuras misiones espaciales a Marte: los polvos planetarios se cargan en contacto con las sondas espaciales y se adhieren a ellas. ¿Cómo evitar que su acumulación haga opacos los paneles solares? Dado que una limpieza mecánica resultaría delicada, una de las soluciones propuestas es elegir el material de la superficie de modo que todos los polvos adquieran una carga del mismo signo. Electrizando luego el panel con la misma polarización, los polvos serían repelidos.

¿Un problema imposible?

Cómo se puede razonar a partir de un cuerpo de conocimiento común entre varios individuos

Gabriel Uzquiano

¿Qué sabe un peatón cuando se dispone a cruzar la calle, tras percatarse del cambio de color del semáforo? No sólo sabe cuál es el estado del semáforo —verde para los peatones y rojo para los vehículos—, sino también que los automovilistas lo saben. De manera similar, los automovilistas se detienen porque se han percatado del cambio de color y porque saben que los peatones saben cuál es el estado del semáforo y se disponen a cruzar. Y los peatones saben que los automovilistas saben que lo saben, etc. Si un peatón no tuviera la certeza de que los automovilistas saben en qué estado se encuentra el semáforo, dudaría antes de cruzar. En casos como éste, se dice a veces que el estado del semáforo es conocimiento común entre automovilistas y peatones.

Veamos tres problemas que requieren razonar a partir de un cuerpo de conocimiento común entre varias personas. Todos proceden de ilustraciones habituales del fenómeno, aunque el tercer problema tiene un interés matemático añadido.

1. Tres hermanos

Tres hermanos han estado jugando en el patio; dos de ellos han regresado a casa con la frente embadurnada de barro. Aunque cada uno ve la cara de los demás, ninguno puede ver su propia frente. Al verlos, su padre les dice: "Al menos uno de vosotros tiene barro en la frente", y añade: "¿Alguno de vosotros sabe si tiene barro en la frente? Que dé un paso al frente todo aquel que lo sepa." Ninguno de los hermanos miente. Además, tras cada ronda de respuestas, el padre vuelve a hacer la misma pregunta hasta que aquellos hermanos que tengan la frente embadurnada den un paso al frente. El problema consiste en averiguar cuándo, y cómo, van a dar un paso al frente los hermanos con la frente embadurnada.

2. Meses consecutivos

Aunque es conocimiento común entre dos personas que nacieron en meses consecutivos de treinta días o más —no necesariamente del mismo año—, ninguna sabe en qué mes nació la otra. Ambas se encuentran aisladas en dos habitaciones contiguas, donde disponen sólo de un reloj que emite una señal horaria cada hora en punto. Sin otro modo de comunicación, deben permanecer en la habitación hasta que una descubra el mes en el que nació la otra y lo anuncie al oír la siguiente señal horaria. No ocurre nada durante las primeras cuatro horas. Al oír la quinta señal horaria, una de ellas anuncia que sabe en qué mes nació la otra. ¿De qué mes se trata?



3. ¿Un problema imposible?

Ni Sergio ni Paola conocen las edades de Daniel o Esteban. Yo, que sí sé cuáles son, susurro la suma de las mismas al oído de Sergio y el producto al oído de Paola. Tras hacer esto público, añado que aunque Daniel, que es el menor, tiene ya más de un año, la suma de ambas edades no llega a los cien años. Tras mi anuncio, Sergio y Paola mantienen el diálogo siguiente:

- Paola: "Lo cierto es que todavía no sé cuáles son las edades."
- Sergio: "Sí, sabía que no lo sabías."
- Paola: "Pues ahora ya lo sé."
- Sergio: "Si, ahora yo también lo sé."

¿Cuáles son las edades de Daniel y Esteban?

Aunque popularizado por Martin Gardner como "el problema imposible", su formulación original data de 1969 y se debe a Hans Freudenthal. Una versión del mismo problema fue pronto formalizada por el informático John McCarthy y dio lugar a multitud de versiones a partir de los años setenta y ochenta.

Soluciones:

Tres hermanos:

Ninguno de los tres hermanos sabe, durante la primera ronda, si tiene la frente embadurnada. Pero al oír las respuestas de los demás, los dos hermanos con barro en la frente razonan como sigue:

A mi alrededor sólo veo a un hermano con la frente embadurnada. Por tanto, si yo no tuviera barro en la frente, entonces éste hubiera visto que ninguno de sus hermanos tiene la frente embadurnada y, por tanto, hubiera podido deducir que él mismo tiene barro en la frente. Pero como no lo hizo, ahora sé que yo sí debo tener barro en mi frente.

Como ambos hermanos con barro en la frente razonan del mismo modo, ambos darán un paso al frente en la segunda ronda. Se puede generalizar la solución al problema. Si empezamos con un grupo de n hermanos y tan sólo m de ellos tienen barro en la frente, entonces estos darán un paso al frente en la ronda m.

Meses consecutivos:

Veamos qué ocurre tras cada una de las señales horarias:

Si no hay anuncio tras la primera señal horaria, entonces el hecho de que nadie sepa en qué mes nació la otra persona se convierte en conocimiento común entre ambas. Al ser febrero el único mes con menos de treinta días, ambos pueden descartar enero y marzo como meses de nacimiento de la otra persona. (Si la otra persona hubiera nacido en enero, entonces se seguiría de lo que sabe que la otra nació en diciembre. Si hubiera nacido en marzo, entonces se seguiría que la otra nació en abril.)

Si no hay anuncio tras la segunda señal horaria, entonces es conocimiento común que el descarte de enero y marzo no basta para que una sepa en qué mes nació



la otra. Se sigue que ninguna nació en diciembre o abril. Tras la tercera señal horaria, pueden descartar también noviembre y mayo y, tras la cuarta, octubre y junio.

Como han nacido en meses consecutivos y sólo quedan tres meses, julio, agosto y septiembre, al oír la quinta señal horaria, la persona que naciera en julio o septiembre anuncia que sabe que la otra nació en agosto.

¿Un problema imposible?

La clave consiste en descifrar qué podemos deducir de cada una de las cuatro afirmaciones ya que, curiosamente, existe tan sólo un par de números compatible con la conversación entre Sergio y Paola:

- De la primera afirmación de Paola podemos deducir que el producto, llamémosle p, no puede ser el producto de dos primos ya que, de serlo, Paola podría deducir de qué números se trata. Por la misma razón, tampoco puede tratarse de un número que no pueda ser representado como el producto de más de un par de números, x e y, cuya suma, $x + y$, sea menor que 100.
- De la primera afirmación de Sergio, se sigue que la suma, llamémosla s, no es la suma de dos primos. ¿Qué más podemos deducir de la misma? En una carta a Leonhard Euler en 1742, Christian Goldbach conjeturó que todo número par mayor que 2 es la suma de dos primos. Aunque todavía no contamos con una prueba de la misma, tampoco se han podido encontrar contraejemplos y, desde 1885, se sabe que la conjetura se cumple para todo número menor que 10.000; de hecho, sabemos, desde 2005, que la conjetura es cierta para todo número menor que 10^{17}. Por tanto, podemos también descartar que la suma sea un número par menor que 100. Y podemos descartar números impares que sean el resultado de sumar dos a un número primo.
- También podemos descartar todo número entre 55 y 100 como un posible valor de s, ya que si $55 \leq s \leq 100$, entonces s sería, entre otras, la suma de 53 y $s - 53$, cuyo producto, $53 \times (s - 53)$, es el producto de sólo dos números cuya suma es menor que 100, es decir, 53 y $s - 53$.

Restan únicamente números impares entre 5 y 53 que no sean el resultado de sumar dos a un número primo:

11, 17, 23, 27, 29, 35, 37, 41, 47, 51, 53

- De la segunda afirmación de Paola, podemos deducir que p es el producto de tan sólo un par de números cuya suma figura en la lista anterior.
- De la segunda afirmación de Sergio, se sigue que s es la suma de tan sólo un par de números cuyo producto no es el producto de ningún otro par de números cuya suma figura en la serie.

— Podemos descartar 11 como la suma, ya que es tanto la suma de 3 y 8 como la suma de 4 y 7. Pero 24 es el producto de sólo dos números cuya suma se encuentra en la lista anterior: 3 y 8. Del mismo modo, 28 es el producto de un solo par de números, 4 y 7, cuya suma se halla en la serie. Pero si la suma hubiera sido 11, entonces la última afirmación de Sergio no hubiera sido cierta, ya que Sergio no hubiera podido averiguar si p es 24 o 28.

Por un razonamiento similar:

— Podemos descartar 23 como la suma ya que es tanto la suma de 4 y 19 como la suma de 16 y 7. Pero, de nuevo, Sergio no podría decidir si p es 76 o 112.
— Podemos descartar 27 como la suma, ya que es tanto la suma de 4 y 23 como de 8 y 19 y como de 16 y 11.
— Podemos descartar 29 como la suma ya que es tanto la suma de 16 y 13 como de 4 y 25.

Argumentos idénticos nos permiten descartar 35, 37, 41, 47, 51 y 53 como valores de la suma s que le di a Sergio. Sin embargo, no podemos descartar 17, ya que existe un solo par de números, a saber 4 y 13, cuya suma, 17, se encuentra en la serie y cuyo producto, 52, no es el producto de ningún otro par de números cuya suma se encuentra en la serie. Veamos la justificación:

— 17 es la suma de 2 y 15, cuyo producto, 30, es también el producto de 5 y 6, cuya suma pertenece a la serie. Se sigue que 30 no es el producto.
— 17 es la suma de 3 y 14, cuyo producto, 42, es también el producto de 2 y 21, cuya suma, 23, se encuentra en la serie. Se sigue que 43 no es el producto.
— 17 es la suma de 4 y 13, cuyo producto, 52, tiene sólo otro par de factores, 2 y 26, cuyo producto es 52. Sin embargo, la suma de 2 y 26, 28, es par y por tanto no pertenece a la serie. *Se sigue que p podría ser 52.*
— 17 es la suma de 5 y 12, cuyo producto, 60, es también el producto de 3 y 20, cuya suma, 23, pertenece a la serie. Se sigue de la segunda afirmación de Paola que 60 no es el producto.
— 17 es la suma de 6 y 11, cuyo producto, 66, es también el producto de 2 y 33, cuya suma, 35, pertenece a la serie. Se sigue que 66 no es el producto.
— 17 es la suma de 7 y 10, cuyo producto, 70, es también el producto de 2 y 35, cuya suma, 37, pertenece a la lista. Se sigue que 37 no es el producto.
— 17 es la suma de 8 y 9, cuyo producto, 72, es también el producto de 3 y 24, cuya suma, 27, pertenece a la lista. Se sigue que 72 no es el producto.

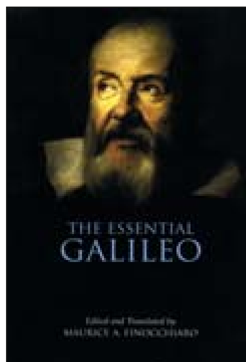
Podemos concluir, pues, que la suma es 17 y que Daniel y Esteban tienen 4 y 13 años, respectivamente. Se trata de un problema difícil, pero no imposible.

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

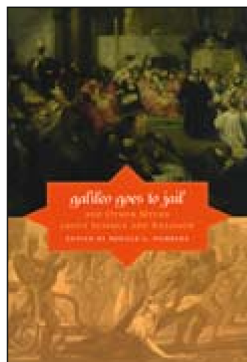
¿Quiere saber más?

H. P. van Ditmarsch, J. Ruan y R. Verbrugge exploran la historia del problema imposible —también llamado "suma y producto"— en la introducción a su artículo "Sum and Product in Dynamic Epistemic Logic" en *Journal of Logic and Computation*, vol. 18, n.º 4, págs. 563-588; 2008.

Vincent Hendricks ha escrito una introducción a la lógica epistémica en la Stanford Encyclopedia of Philosophy: http://plato.stanford.edu/entries/logic-epistemic/



THE ESSENTIAL GALILEO.
Edición preparada y traducida al inglés por Maurice A. Finocchiaro. Hackettt Publishing Company, Inc.; Indianapolis, 2008.



GALILEO GOES TO JAIL AND OTHER MYTHS ABOUT SCIENCE AND RELIGION.
Dirigido por Ronald L. Numbers. Harvard University Press; Cambridge, Massachusetts, 2009.

Galileo

Legado genuino y mito histórico

La Unesco y la Unión Astronómica proclamaron el 2009 Año Internacional de la Astronomía, en homenaje conjunto a las primeras observaciones telescópicas de Galileo, cuando detectó las lunas de Júpiter y a la aparición de la *Astronomia nova*, la obra espléndida de Johannes Kepler, donde mostraba que los planetas, en su movimiento, dibujan curvas elípticas. De ambos hitos hace 400 años.

Hemos escogido para adentrarnos en el mundo de Galileo un compendio de los principales fragmentos que van concatenando su pensamiento científico (*The Essential Galileo*) y un capítulo, el octavo, de un libro que pone en evidencia los mitos y fábulas de determinados episodios de la ciencia (*Galileo Goes to Jail*). El autor en ambos casos es Maurice Finocchiaro. Entre las principales contribuciones en física y astronomía que recoge la selección no podían faltar la ley de inercia y las leyes de la caída de los cuerpos, la ley del péndulo y el movimiento de los proyectiles, el telescopio, las montañas de la Luna, los satélites de Júpiter, las fases de Venus y las manchas solares, así como la confirmación de la teoría copernicana del movimiento de la Tierra.

No fue Galileo un metafísico que especulara sobre los problemas del ser y la nada, sino un pensador crítico, ducho en geometría, preocupado por cuestiones epistemológicas y metodológicas sobre la naturaleza de la verdad y el conocimiento de la naturaleza. De carácter vehemente, se vio involucrado en sucesivas controversias. Con sus antagonistas científicos debatía sobre el papel del telescopio en el aprendizaje de aspectos novedosos de la realidad, sobre la función de la autoridad (aristotélica u otras) por encima de la opinión individual y sobre la misión de la matemática en el estudio de los fenómenos naturales. Con sus antagonistas eclesiásticos, Galileo ponía en duda que la Escritura sirviera de fuente de información científica y disputaba si las teorías científicas que contradecían el sentido literal de la Biblia debieran tratarse como meras hipótesis. Controvertido era también el estatuto de la hipótesis: ¿descripción potencialmente verdadera de la realidad o mero instrumento de cálculo y de predicción?

Galileo nació en Pisa en 1564, en cuya universidad ingresó a los diecisiete años para estudiar medicina, pero pronto cambió a la matemática, disciplina en la que ahondó a extramuros de la academia. De hecho, en 1585 abandonó la universidad sin haber obtenido ningún título académico. Lo que no fue óbice para que, cuatro años más tarde, fuera nombrado profesor de matemática de la Universidad de Pisa y, de 1592 a 1610, lo propio en la de Padua. Durante ese período de su juventud docente se centró en el estudio de la naturaleza del movimiento en general y en la caída de los graves en particular. Crítico con la física aristotélica, su relación con Guidobaldo del Monte le gana para la geometría de Arquímedes. En 1609, perfeccionó el recién inventado telescopio y se sirvió del mismo para realizar espectaculares descubrimientos, que describió en *El mensajero celeste* (1610) y en su correspondencia sobre las manchas solares.

En julio de 1611 lo encontramos inmerso en el debate sobre el comportamiento de los cuerpos en el agua. Coherente con la hidrostática arquimedeana, proponía que el hielo era agua rarificada; por eso flotaba y, por tanto, era más ligera (en peso específico) que el agua. Se oponía a la tesis aristotélica, que describía el hielo como agua en condensación y flotaba merced a su forma. Se disputaba, pues, sobre el papel desempeñado por la forma y la densidad. Los aristotélicos introdujeron el experimento supuestamente crucial de que la madera de ébano se hundía cuando presentaba una forma redonda, para flotar si constituía una plancha plana. Los aristotélicos consideraron este experimento como una demostración inapelable de que la forma, y no el peso específico, determinaba la suspensión o el hundimiento de los cuerpos. Galileo, que en ese debate tuvo de su parte a Maffeo Barberini, quien se convertiría en el papa Urbano VIII en 1623, sistematizó sus ideas en el *Discurso sobre los cuerpos en el agua*, que se publicó en la primavera de 1612.

Por entonces, se sintió atraído también por otra cuestión controvertida, la relativa a las manchas solares. No se sabe cuándo exactamente las observó con su telescopio. Su contrincante aquí fue el jesuita Christoph Scheiner, quien, entre noviembre y diciembre de 1611, escribió tres cartas a Marc Welser sobre ese enigmático fenómeno. Aparecieron en enero de 1612 en un librito titulado *Tres cartas sobre las manchas solares*. Welser le envió un ejemplar a Galileo solicitándole su opinión. En mayo, Galileo le contestó con una epístola extensa criticando las opiniones y observaciones de Scheiner y adelantándole la suya propia. Una segunda carta de Galileo a Welser la siguió en agosto. Mientras tanto, tras leer la primera carta de Galileo, Scheiner escribió otro ensayo, *Una investigación más precisa*

sobre las manchas solares. De nuevo, Galileo recibió un ejemplar de Welser y le escribió una tercera carta.

En marzo de 1613 la Academia de los Linces publicó en Roma un volumen con las tres cartas de Galileo y un apéndice con los dos opúsculos de Scheiner: *Historia y demostraciones sobre las manchas solares*. Disputas de prioridad del descubrimiento de las manchas aparte, la controversia se centraba en la interpretación de las manchas solares y sus implicaciones en la teoría copernicana. Scheiner sostenía que las manchas eran enjambres de pequeños planetas que giraban en torno al Sol a distancias muy cortas. Uno a uno eran invisibles; pero cuando varios a la vez alcanzaban la línea de visión (de un observador desde la Tierra), entonces aparecían como manchas obscuras proyectadas sobre el Sol. La interpretación de Scheiner salvaba una parte esencial de la cosmovisión aristotélica, a saber, la dicotomía Tierra-cielo. De acuerdo con esa doctrina, los cuerpos terrestres diferían de los objetos celestes; sólo los cuerpos terrestres se hallaban sometidos a cambios físicos (generación y destrucción). Para Scheiner la única novedad requerida por las manchas solares era la existencia de planetas hasta entonces desconocidos.

Según Galileo, las manchas solares se desarrollaban y disolvían una a una en el Sol, si bien experimentaban, en conjunto, un movimiento regular en sentido este; de lo que se infería que el astro giraba sobre su eje (con un período perimensual) y experimentaba cambios físicos de una naturaleza similar a los operados en la Tierra. (Las manchas solares equivaldrían a las nubes terrestres.) Y eso a su vez arruinaba el postulado clave de la dicotomía.

Los aristotélicos reaccionaron contra Galileo, basados en el carácter contraintuitivo de la tesis copernicana y escudados en ciertos pasajes bíblicos que hablan de una Tierra firme. El fragmento más socorrido era el de Josué 10: 12-13: "El mismo día en que el Señor entregó a los amorreos en poder de los israelitas, Josué se dirigió al Señor y dijo: ¡Sol, detente sobre Gabaón! ¡Y tú, luna, sobre el valle de Ayalón! Y el sol se detuvo y la luna se paró hasta que el pueblo se vengó de sus enemigos. Todo esto está escrito en el Libro del Justo. El sol se detuvo en el cielo y tardó un día entero en ponerse".

Como midiendo las consecuencias, Galileo va esbozando su crítica en la correspondencia privada: una carta en diciembre de 1613 a Benedetto Castelli, profesor de matemática en Pisa, y en la primavera de 1615 a la duquesa Cristina. Entiende que el sentido adecuado de la Escritura, cuando se trata de fenómenos naturales, sólo puede determinarse tras la observación o el estudio directo; si no concuerdan, se deberá a que no sabemos interpretar el significado del libro sagrado. Por lo demás, la Biblia constituye autoridad sólo en materia de fe y moral, pero no en el terreno de la ciencia. Le parece altamente cuestionable que el movimiento de la Tierra contradiga la Escritura: el texto de Josué, sigue, encaja mejor en una explicación geocinética, en particular mejorada por el propio descubrimiento de Galileo de la rotación solar axial.

La situación se exacerbó en enero de 1615, cuando Galileo recibió el apoyo inesperado de Paolo Antonio Foscarini, autor de *Carta sobre la opinión mantenida por pitagóricos y por Copérnico sobre el movimiento de la Tierra, la estabilidad del Sol y el nuevo sistema del mundo pitagórico*. Aunque escrito en estilo epistolar y dirigido al general de la Orden carmelitana, el libro se convirtió en documento público. Los argumentos de Foscarini se solapaban con los de Galileo: el movimiento de la Tierra era probablemente verdadero y compatible con la Escritura.

En febrero de 1615, Niccolò Lorini denunció a Galileo ante la Inquisición, incluyendo su "Carta a Castelli" como prueba incriminante. Luego, en marzo, Tommaso Caccini realizó una deposición personal contra Galileo ante la Inquisición romana. Se incoó un expediente de investigación que duró un año. Galileo no fue convocado ni interrogado, en parte porque los testigos clave le exoneraban y en parte porque sus cartas no habían sido publicadas, en tanto que sus escritos editados no contenían ni una aserción categórica del copernicanismo ni una negación de la autoridad científica de la Biblia.

En diciembre de 1615, Galileo tomó la decisión personal de acudir a Roma para defender sus puntos de vista. Las puertas se le franquearon. Pudo incluso alardear de haber evitado una condena formal del copernicanismo. Pero en febrero del año siguiente, recibió un aviso privado de Belarmino para que se abstuviera de sostener el movimiento de la Tierra. Dio su palabra de cumplirlo. Mientras tanto, otra institución romana, la Congregación del Indice, prohibía la publicación de diversos libros heliocentristas "hasta que se corrigieran".

En 1618 aparecieron tres cometas en sucesión. El tercero mostró un brillo extraordinario. Al hilo del debate desencadenado, Orazio Grassi escribió una *Disputa astronómica sobre los tres cometas del año 1618*, replicada por Galileo y Mario Guiducci en el *Discurso sobre los cometas*, contrarreplicada al poco en *Balance astronómico y filosófico*. Las posturas se enconaron y Galileo volvió a responder con *El ensayador,* aparecido en Roma en octubre de 1623.

Había en liza varias cuestiones astronómicas y filosóficas. Una sobre la sede. ¿Se dan los cometas en la atmósfera terrestre, de acuerdo con la propuesta de Aristóteles, o en los cielos, tesis de Tycho Brahe? Según la sede, se comprometía la dicotomía Tierra-firmamento. Otra cuestión atañía a la trayectoria precisa seguida por el tercer cometa: ¿podía explicarse en el marco de una teoría geostática o debía integrarse en un marco heliocéntrico? Y había implicaciones de alcance más general: cuál sería el papel de la autoridad y la independencia racional en la investigación científica.

Animado por el éxito de sus propuestas, Galileo confeccionó un diálogo entre tres personajes que debatían los argumentos físicos y epistemológicos en torno a las cosmovisiones enfrentadas, el *Diálogo sobre los dos sistemas principales del mundo, el ptolemaico y el copernicano*, publicado en 1632. Defiende que los razonamientos y las pruebas en favor de la teoría geocinética son mucho más robustos que los argumentos y las pruebas a favor de la tesis geostática; por consiguiente, el movimiento de la Tierra resulta mucho más probable que el geoestaticismo. Incorporaba los nuevos descubrimientos telescópicos, sus conclusiones sobre la física de los cuerpos móviles, una explicación geocinética de las mareas y diversas reflexiones metodológicas.

Pero el libro, aducían sus enemigos, no abordaba el movimiento de la Tierra como hipótesis, porque no lo consideraba un instrumento de cálculo y predicción, sino como una posibilidad real. Se le acusaba también de defender el movimiento de la Tierra porque se criticaban los argumentos en contra, mientras que no se actuaba así con los que lo presentaban

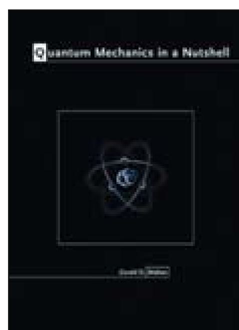
favorablemente. Ambos cargos suponían la violación del decreto del Indice y el aviso privado de la Inquisición. Galileo fue llamado a Roma, a la que llegó en febrero de 1633.

El juicio concluyó el 22 de junio de 1633 con sentencia firme. Fue hallado reo de culpabilidad de una categoría de herejía intermedia entre la más grave y la menos grave: la "sospecha vehemente de herejía". Las creencias objetadas eran la tesis del movimiento de la Tierra y el principio metodológico de que la Biblia no era una autoridad científica. Hubo de abjurar. El *Diálogo* fue prohibido. La sentencia le condenaba a prisión perpetua, que fue de inmediato conmutada por arresto domiciliario. Así, durante una semana estuvo en el suntuoso palacio romano del duque de Toscana. Luego pasó unos cinco meses en la residencia del arzobispo de Siena. Y, por fin, en diciembre de 1633 se recluyó en su propia casa de Arcetri, donde murió en 1642, asistido por su hijo Vincenzo y sus discípulos Vincenzo Viviani y Evangelista Torricelli.

Contra el mito, muy extendido, Galileo ni sufrió torturas ni fue encarcelado. Finocchiaro encabeza su artículo con tres juicios creadores o mantenedores de la mentira. El primero, de Voltaire, en 1728: "El eximio Galileo, cumplidos los cuarenta, pasó sus días en las mazmorras de la Inquisición por haber demostrado mediante pruebas irrefutables el movimiento de la Tierra". El segundo, de Giuseppe Baretti, en 1757: "El famoso Galileo estuvo en manos de la Inquisición durante seis años y sometido a torturas por declarar que la Tierra se movía". El tercero, reciente (1979), de Italo Mereu: "Decir que Galileo sufrió tortura no es una declaración osada, sino sencillamente repetir lo que afirma la sentencia. Especificar que sufrió torturas sobre sus intenciones no constituye ninguna inferencia arriesgada, sino que es, de nuevo, explicitar lo que dice el texto. Esos son testimonios visuales, no intuiciones mágicas; hechos demostrados, no introspecciones cabalísticas".

La sentencia retomaba el proceso desde 1613, resumía los cargos de 1633 y recogía la defensa y confesión de Galileo. El texto y la abjuración fueron los únicos documentos del juicio publicados en su tiempo. Por fin, el singular trato de favor recibido por el protagonista suele atribuirse a tres factores: la protección de los Medici, la fama de Galileo y la actitud de amor-odio del papa Urbano.

Luis Alonso



QUANTUM MECHANICS IN A NUTSHELL,
por Gerald D. Mahan. Princeton University Press; Princeton, 2008.

Manuales

Un libro de texto de física cuántica con menos conceptos y más aplicaciones

Desde el primer libro de mecánica cuántica, el escrito por Dirac a finales de los años veinte del siglo pasado, se han ido publicando cientos, muchos de ellos excelentes. Entre estos, algunos cuyos autores son españoles, como los de A. Galindo y P. Pascual, F. J. Ynduráin o J. Sánchez Guillén y M. Braun. Algunos son más conceptuales: ponen el énfasis en las motivaciones y nociones físicas, con especial cuidado en los postulados. Otros cuidan el rigor matemático, para poder tratar así algunos temas delicados. Y los hay donde se pretende que el lector tenga una visión de las muchas aplicaciones. Como abarcan diversas materias (la electrónica, el estado sólido, la física molecular, la atómica, la óptica, la nuclear y física de partículas elementales), la selección de las aplicaciones da lugar también a variedad.

Tal abundancia hace que nos preguntemos por la necesidad de un libro más, y cuál es la originalidad para que se haga recomendable su lectura. En el caso que nos ocupa, el libro tiene su origen, como el autor indica en el prólogo, en cursos universitarios impartidos durante muchos años en los que surgió la necesidad de incluir material que no se encontraba en la mayoría de los libros de texto.

Es en la variedad de aplicaciones y ejemplos donde reside la fortaleza de este libro. Los ejemplos abarcan desde átomos y pequeñas moléculas hasta aplicaciones de estado sólido, como los niveles de Landau y el efecto Hall cuántico, pasando por ejemplos de química-física, como el modelo de Huckel. En capítulos más usuales, por ejemplo el dedicado a la dispersión, también incluye asuntos, como el efecto Ramsauer-Townsend o la dispersión por fluidos, que generalmente no se incluyen en libros de esta naturaleza. En este apartado, sin embargo, se echa en falta que no se mencionen las resonancias, lo cual, teniendo en cuenta su importancia, no es una omisión menor. Tampoco hay mención a la validez de las aproximaciones, en particular la de Born. Debería mencionarse que en mecánica cuántica no basta con que el término de una serie sea pequeño, dado que si la serie da lugar a una probabilidad, las propiedades definitorias de ésta podrían alterarse.

El libro no tiene la estructuración ordinaria: postulados, soluciones exactas de la ecuación de Schrödinger, simetrías, aproximaciones, teoría de la dispersión. Apenas se pone atención en los postulados, ni se mencionan aspectos fundamentales, como el principio de indeterminación. De la lectura del libro tampoco queda claro el concepto de espín. Las representaciones aparecen sólo en el capítulo de momento angular, y el lector podría pensar que sólo están ligadas a él. No se abordan las simetrías; utiliza sólo la de las rotaciones espaciales al tratar el momento angular, y la de aforo (*gauge*) al tratar la interacción electromagnética. No se estudian los potenciales periódicos ni la estructura de bandas del espectro. Hay algunos temas importantes que no se tratan, como los estados mezcla y el operador densidad. Tampoco hay ninguna discusión sobre la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica y solamente de pasada se menciona a Bell, aunque no a sus desigualdades.

En resumen, un libro con muchas aplicaciones, adecuado para tenerlo en la biblioteca, aunque con ausencias notables de cuestiones conceptuales importantes.

Carlos Pajares
Universidad de Santiago de Compostela

EN EL PROXIMO NUMERO DE AGOSTO 2009



Planetas improbables,

por Michael W. Werner y Michael A. Jura

Los astrónomos están descubriendo planetas en torno a estrellas de un tamaño similar al de esos cuerpos celestes.

Mutaciones silenciosas,

por J. V. Chamary y Laurence D. Hurst

Se producen cambios sutiles en las secuencias de ADN, antaño reputados irrelevantes para la codificación proteínica, que adquieren importancia determinante en la enfermedad y en la evolución.



La crisis del fósforo,

por David A. Vaccari

Este recurso subestimado, componente fundamental de los abonos, durará todavía varios decenios. Pero si queremos evitar el colapso de la agricultura, debemos acometer de inmediato su conservación.



Fermi, Pasta, Ulam y el nacimiento de la matemática experimental,

por Mason A. Porter, Norman J. Zabusky, Bambi Hu y David K. Campbell

Hace 54 años, Enrico Fermi, John Pasta y Stanislaw Ulam informaron de un experimento numérico que todavía hoy sigue alentando nuevos descubrimientos.

Láseres ultralargos,

por Juan Diego Ania Castañón

Láseres de fibra óptica de gran longitud pueden transmitir información sin que sufra pérdidas en su interior.

